# اختبارات المواد الهندسية

أ. د. جعفر الحيدري
دائرة هندسة المواد والمعادن
جامعة البلقاء التطبيقية



# اختبارات المواد
# الهندسية

الطبعة الأولى
1434هـ -2013م

الحيدري، جعفر .
اختبارات المواد الهنسية /جعفر الحيدري ،

عمان دار المعتز للنشر 2013

ر.أ:2012/9/1885

الواصفات /المواد الهندسية//اختبارات //

*أعدت دائرة المكتبة الوطنية بيانات الفهرسة والتصنيف الأولية

# اختبارات المواد الهندسية

أ. د. جعفر الحيدري
دائرة هندسة المواد والمعادن
جامعة البلقاء التطبيقية

المعتز للنشر والتوزيع

# الإهداء

إلى رفيقة دربي الطويل

إلى مَن وقفت معي في السراء والضراء

زوجتي العزيزة ...

إلى أولادي الأحبـاء ...

إلـى طلبتـي الأكـارم...

أُهـدي كتابـي هـذا

جعفر الحيدري

بسم الله الرحمن الرحيم

# المقدمـــــة

لقد لاحظت خلال أكثر من عشرة سنوات من تدريسي لمادة (اختبار المواد الهندسية) أن مفرداتها غير موجودة في مصدر واحد. وذلك لاختلاف أسس وتقنيات كل مجموعة من الإختبارات عن المجموعة الأخرى. وهذا ما يصعب على الطالب في المرحلة الجامعية الأولية أو حتى من يريد الإطلاع وبصورة موجزة على طرائق الاختبارات سواء الإئتلافية منها أو اللاإئتلافية.

ولذا فقد رأيت أن كتاباً يفي بالأسس النظرية ولايغفل الناحية التطبيقية سيسد فراغاً في هذا المجال وسيعود بالفائدة ليس على طلبة قسم هندسة المواد والمعادن فحسب بل على طلبة أقسام الهندسة الميكانيكية أو هندسة الإنتاج او الهندسة الصناعية او الأقسام المناظرة الأخرى في جامعات ومعاهد الوطن العربي.

وأنا لا أدعي إنني قد بلغت الكمال في إعداد مفردات هذا الكتاب وإنما هو حصيلة مجموع خبرتي من خلال تدريسي ومطالعاتي وبحوثي. وما أجمل قول العماد الأصفهاني في هذا المجال «إنني رأيت انه لايكتب إنسان كتاباً في يومه إلا قال في غده لو غيرت هذا لكان احسن ولو زيدت هذا لكان أجمل، وهذا أعظم العبر وهو دليل على استيلاء النقص على جملة البشر».

والله اسأل أن يوفقني لخدمة طلبتنا الأعزاء في وطننا العربي الحبيب.

**جعفر الحيدري**

**السلط – جامعة البلقاء التطبيقية**

# المحتويات

# الفصل الأول

## الاختبارات اللاإتلافية Nondestructive Testing

### ١-١ المقدمة

قبل مدة ليست بالطويلة كان المصممون يصرّون على أن المواد المستخدمة يجب أن تكون خالية من العيوب تماماً إلا أنه أكتشف فيما بعد ان هذا التحديد شيء غير عملي وغير دقيق في نفس الوقت لكنه يمكن القول ان المفروض بالمواد الهندسية أن تكون خالية من العيوب الخطره والتي لايمكن استخدام الاجزاء او المواد بوجودها او أن عمرها سينخفض الى جزء قليل من عمرها المفروض.

أما الآن فمن المعروف ان جميع المواد الهندسية تحتوي بعض العيوب بصورة أو أخرى، والتي يمكن ان تقسم الى ثلاثة أنواع رئيسية هي:

١- العيوب الضارة والتي قد تكون بحد ذاتها خطره آنياً أو قد تكون من النوع او في المكان التي يمكن أن تنمو الى حد الخطورة عند الإشتغال او الخدمة.

٢- العيوب غير الضارة إما لكونها صغيرة الحجم أو وجودها في مكانٍ لايؤثر على الإستخدام كالمسامات الدقيقة جداً في مكانٍ خالي من الإجهادات الداخلية على سبيل المثال.

٣- العيوب المفيدة، كالعيوب المتحركة الموجودة في البنية البلورية كالإنخلاعات (dislocations) حيث أن قابليتها على الحركة والتفاعل فيما بينها تمنح المادة المتانة (toughness) المطلوبة والاكتنافات الصغيرة (Small inclusions)

ومجمل التصقيحات (gross Laminations) وغير ذلك من العيوب التي من شأنها أن تزيد من المتانة باعاقة نمو الشقوق التي تعترضها.

وإذا أريد للفحوص اللااتلافية (NDT) (وهو الإصطلاح الذي يطلق على كل الطرائق الممكنة لفحص المواد او الأجزاء من دون إتلافها أو التأثير على العمل الذي صممت من أجله او على عمرها فيما بعد. ومن وجهة النظر الصناعية فإن الفحوص اللا اتلافية تقرر مدى صلاحية المادة او الجزء للعمل الذي صمم من أجله ) أن تعطي نتائج جيدة فإنها يجب ألا تقتصر على تقرير وجود العيب او عدمه فحسب بل تعين شكله وحجمه وكذلك تعين نوعية العيوب سواء كانت ضارة ام غير ضارة وحسب العمل المصمم من أجله ذلك الجزء او المنتوج. ومن الجدير بالذكر فإن المصمم هو الذي يقرر الطريقة الأمثل للفحص وكذلك صلاحية الجزء او عدمه وحسب دليل التصميم الهندسي الذي يشير الى مدى إمكانية وحدود وكذلك تكاليف الطرائق العامة للفحوص اللا اتلافية.

## ٢-١ الغاية من الفحص (The aim of the test):

يجب فحص المنتوجات الهندسية أثناء وبعد التصنيع وعادةً تفحص اثناء الخدمة والعمل ايضاً ضماناً لصلاحيتها التامة للأغراض المصممة من اجلها وكذلك تفحص المنتوجات لضمان النوعية المطلوبة والسيطرة عليها. ومن خلال خبرة المهندسين والمشتغلين في مجال الفحوص اللا إتلافية يمكن تحقيق الغاية المتوخاة من الفحص.

وهناك اربع حقائق تحدد الطريق الى الفحوص اللا اتلافية وهي:

١- كون العيوب موجودة في المواد بمديات واسعة من الأنواع والحجوم.

٢- هناك بالمقابل مدى شامل من الأدوات والأجهزة لكشف العيوب.

٣- تؤثر بعض العيوب سلباً على سلامة الجزء (المنتوج) وبعضها لاتضر عند تواجدها فيه.

٤- مكان العيب وشكله وميله هي في الغالب أكثر أهمية من حجمه بصورة منفردة

او عدد مثل هذه العيوب في الجزء، مع الاخذ بنظر الاعتبار المسافة بين العيوب فإذا كانت المسافة صغيرة فربما تعمل العيوب المتناثرة والمتقاربة كعيب كبير واحد.

وكما ذكر آنفاً فهناك عيوب على المستوى الذري فعلى سبيل المثال فالمليمتر المكعب الواحد من الفولاذ المطيل (mild steel) يحتوي على ملايين العيوب، على المستوى الذري، كالشغور (vacancies) والإنخلاعات ، وأن قابلية بعض هذه العيوب على الحركة والتضاعف والتفاعل فيما بينها هي التي تجعل المعادن متينة وقابلة على تحمل تراكيز الاجهادات عند الثلمات او الحزوز (notches) وقابله للتشكيل والتشغيل والانحناء المفيد اضافة الى تحملها للصدمات. وهذه الصفات هي الأساس التي جعلت المعادن تستخدم لأغلب الاغراض الهندسية. أما الخزفيات فمع أنها صلدة جداً إلا أنها هشة وهشاشيتها هذه ناشئة بالدرجة الأساس من عدم امكانية هذه العيوب على التحرك و التضاعف خلال الماده.

ومن المعلوم ان المقصود بالعيوب عند التكلم عن طرائق الفحص اللا اتلافية هي تلك العيوب التي تكون أكبر بكثير من الإنخلاعات وعيوب البنيه الذرية الاخرى وكذلك الترسبات الدقيقة جداً. والتي تعنينا هنا هي العيوب التي إذا وجدت في الجزء قد تودي الى فشله في أداء العمل المصمم من أجله كالفطور والشقوق في أنابيب الضغط العالي والمراجل، على سبيل المثال، الى غير ذلك من أنواع العيوب.

وبما أن وجود العيب في الجزء هوليس المعيار الوحيد لرفض او قبول او تصليح الجزء فهناك عوامل أخرى تشترك في تحديد ذلك إلا أنه من المهم جداً ان تعيّن العيوب المرفوضة (أي التي يُرفض الجزء عند وجودها فيه) مسبقاً وبشكل واضح ومن ثم تبقى العيوب الاخرى التي لا يضر وجودها بعمل الجزء.

ومن الممكن استنباط بعض القواعد الهامة في الفحوص اللا إتلافية هي:

١- عدم إمكانية وجود جزء خالي من اي خلل تماماً والسعي لتحقيق ذلك سيكلف كثيراً.

٢- الفحص بشكل غير مؤثر (سواءً باختيار الطريقة او أسلوب الفحص) سيكلف ثمناً باهظاً في الأموال وربما في الأرواح أيضاً.

٣- الإسراف في تعدد طرائق الفحص لجزء معين فيه هدر للأموال والوقت الى جانب استهلاك الاجهزة، كما أن تعدد الطرائق قد لايحسّن النتائج كما لو تم اختيار الطريقة المناسبة فقط.

٤- العيوب المكتشفة في الجزء يجب إلا تصلّح مباشرة قبل ان تُدرس جيداً فقد يكون تصليحها أكثر ضرراً على الجزء مما لو تركت على ماهي عليه.

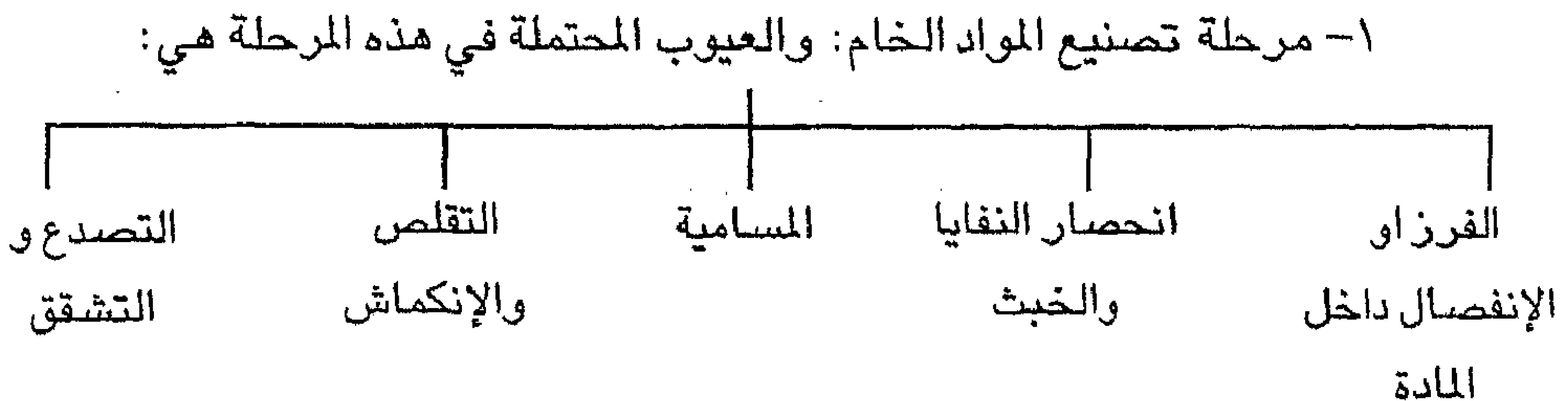
٥- المصمم هو الذي ينتقي عادة الطريقة المناسبة للفحص والفترة البينيه بين فحص وآخر وذلك لضمان سلامة الاجهزة والعاملين. ويعتمد ذلك على آلية وأسلوب الكسر أو العيب المتوقع في الجزء، فيجب أن تدرس ومنها يتم استنتاج العيوب الخطرة التي تؤدي الى هذا الكسر في المنتوج عند الخدمة اوالعمل ومن هذه المعلومات يتم تعيين طريقة الفحص والفترة الزمنية بين فحص وآخر.

وتوجد بعض المصادر والكتب حول ماهو مقبول من أنواع العيوب في المواد مع مختلف الغايات المصممة من أجلها مثل مطبوعات المعهد البريطاني للمواصفات والمقاييس اضافة الى مطبوعات معهد اللحام.

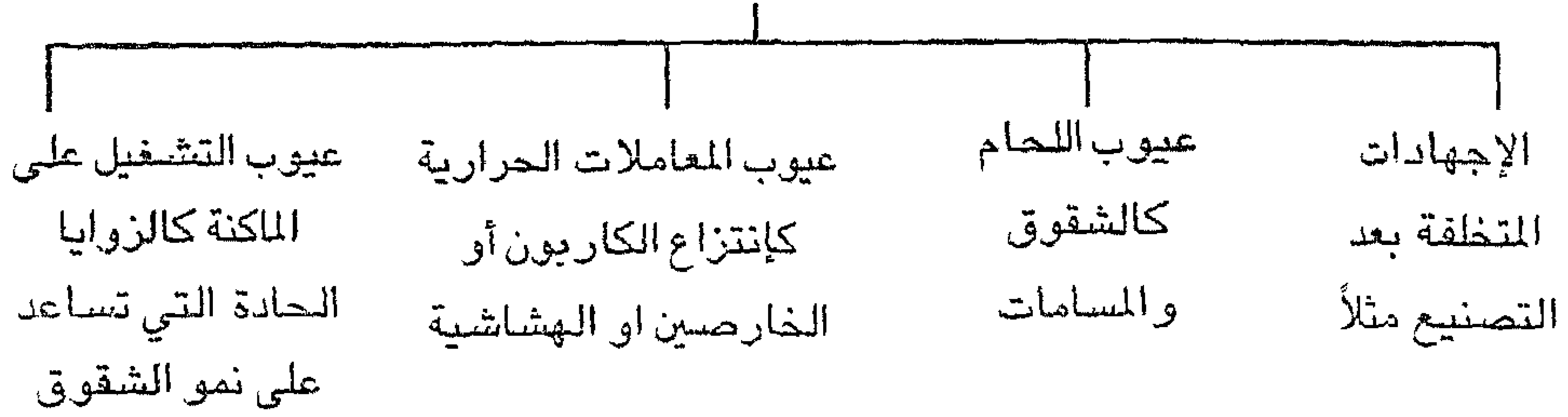
## ٣-١ طبيعة العيوب ومصادرها Nature and Sources of Defects :

يمكن أن تصيب العيوب او التصدعات والخلل.. الخ المنتوج الصناعي في اي مرحلة من مراحل عمره وكما مبين بالتخطيط التالي:

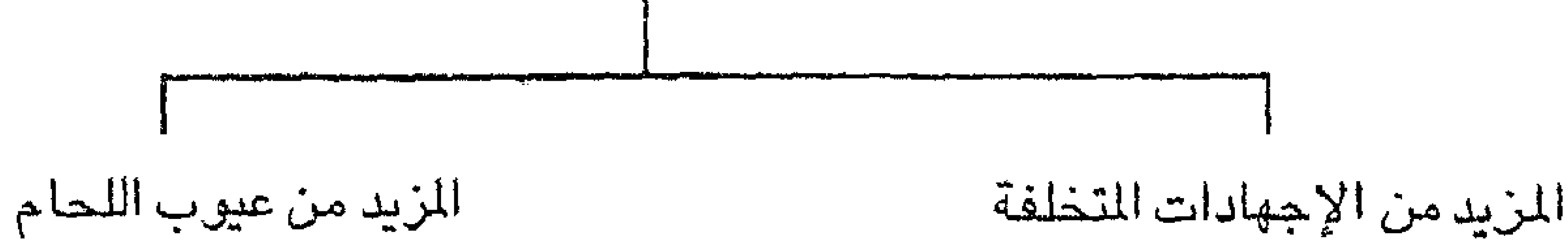
١- مرحلة تصنيع المواد الخام: والعيوب المحتملة في هذه المرحلة هي:



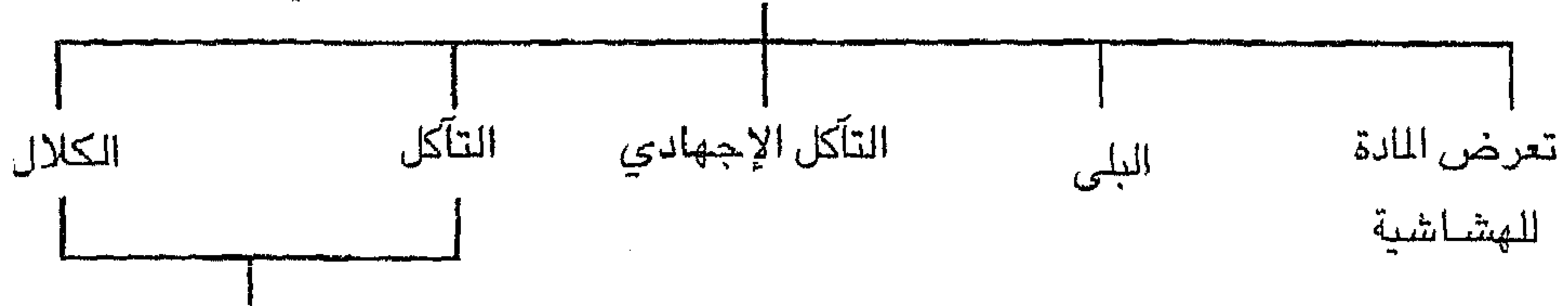
٢- مرحلة تصنيع الاجزاء: والعيوب المحتملة في هذه المرحلة هي:




٣- مرحلة تجميع الاجزاء: والعيوب المحتملة هنا هي:




٤- العيوب والتلف المتولد أثناء الخدمة والإستعمال وهي:




وعند اجتماع سببان تكون المشكلة أخطر كالكلال في محيط تآكلي

فلو أخذنا الفولاذ كأحد المواد الهندسية المهمة المستخدمة في الصناعة، ومع استثناءات قليلة ، فالمعدن إما أن يستخلص من خاماته أو من البقايا المنبوذة أو المستهلكة (الخردة Scrap) وفي العادة بالطريقتين، وكلتا الطريقتين تتضمن فصل المعدن من أكاسيده وعزله عن الشوائب الاخرى أثناء عملية الصهر. يظل المعدن المنصهر محتوياً على نسبة من الشوائب وبعضها هي التي تسبب العيوب في المنتوج النهائي.

وبالإضافة الى الشوائب آنفة الذكر فإن أغلب المعادن المنصهرة تتقلص او

تنكمش أثناء عملية التجمد (عند تحول السائل الى صلب) وهذه الخاصية قد تولد فجوات أنبوبية او مناطق مسامية او شقوق.

هناك عيوب ذات طبيعة صفائحية ناتجة في الغالب من طي الغشاء الرقيق الموجود عادة على سطح المعدن أثناء عملية التشكيل. حيث تدخل هذه الأغشية الاوكسيدية داخل القطعة المعدنية لتؤدي الى نقصان مقاومتها ومن ثم أنهيارها أثناء الإستخدام.

تنشأ عيوب جديدة غالباً في مرحلة تصنيع وتجميع الاجزاء وخاصة إذا استعمل اللحام في هذه المرحلة. فيمكن ان ينحصر الخبث والفجوات الغازية أثناء عملية اللحام وما يصاحب ذلك من تشوه وتشقق ناتجين عن الحرارة العالية والصهر الموضعي إضافة الى الإجهادات المتخلفة نتيجة لذلك. وأخيراً بالنسبة الى تأثير الخدمة والإستعمال على العيوب المتولدة في الجزء ، فهناك على سبيل المثال التآكل (Corro-sion) وهو عيب شائع جداً إلا أن الكسر أو الإنهيار الذي يصيب الأجزاء أثناء الخدمة غالباً ما يكون سببه الكلال. فالشقوق إذن من أخطر العيوب التي تؤدي الى الإنهيار إذا تركت تنمو، لذلك يجب التحري والتفتيش عنها جيداً بطرائق لاإتلافية طبعاً. وتزداد الخطورة أثناء الإستخدام إذا اجتمع أكثر من عامل من العوامل التي تؤدي الى نشوء العيوب، ككلال التآكل (هو الكلال عندما يكون الجزء في محيط يتفاعل معه بشكل او آخر) أو التآكل الإجهادي (هو التآكل عندما يكون الجزء تحت تأثير أجهاد ما سواء كان خارجي أم داخلي) ، فحينئذٍ يكون عمر الجزء أقصر بالطبع.

## ٤-١ طرائق الفحص اللا اتلافي:

يمكن تقسيم طرائق الفحص بشكل عام الى نوعين من الفحوص تبعاً لتأثير عملية الفحص على الجزء المفحوص وهي:

١- **طرائق الفحص الاتلافيه** ، وهي الطرائق التي لايمكن استخدام الجزء بعد الفحص للغرض المصمم من أجله في لغلب كفحوص المجهر الإلكتروني سواء النافذ او الماسح والمجهر الضوئي والتحليل الكيماوي وأغلب الفحوصات الميكانيكية وحيود الأشعة السينية وغيرها.

٢- **طرائق الفحص اللا إتلافية**، والتي نحن بصددها في هذا الفصل، وقد مرّ تعريفها في البداية. أنه قد يتبادر الى الذهن أنها الطرائق التي تكشف العيوب فقط كالشقوق وغيرها، وفي الحقيقة يمكن استخدامها لأبعد من ذلك فتستخدم في دراسة النواحي المتعلقة بالنوعية وتجانس المواد سواء من الناحية الفيزياوية او الكيماوية فهي بحق فرع من فروع علم المواد. وأهم الطرائق الشائعة الإستخدام في الفحص هي:

١- طريقة المعاينة البصرية Visual Technique

٢- طريقة السوائل المتغلغة Liquid Penetrant

٣- الفحص بالدقائق المغناطيسية Magnetic Particle test

٤- الطريقة الشعاعية Radiography ويمكن استخدام عدة تقنيات هي:

أ- الأشعة السينية X-rays

ب- أشعة كاما Gamma - rays

جـ- التشعيع بالنيوترونات Neutron radiography

٥- طريقة التيارات الدوامة Eddy crrent

٦- الفحص بالموجات فوق السمعية Ultrasonic Test

وهناك الكثير من طرائق الفحص اللااتلافي الأخرى أقل شيوعاً أو تستخدم في حالات خاصة ومنها:

١- انبعاث الأمواج السمعية وفوق السمعية Aucustic and ultrasonic Emission

٢- الفحص الحراري Thermal Test

٣- المقاومة الكهربائية Electrical Resistance

٤- الأمواج الدقيقة (المايكروويف) Microwaves

٥- التداخل الصوري المجسم Holography

وقد يكون هناك طرائق أخرى في دور التطوير والأعداد وحسب ما تتطلبه المواد والأجزاء الهندسية المستحدثة. إلا أنه من الجدير بالذكر أن لكل طريقة من طرائق الفحص مزاياها ومحدودياتها (قصورها)، لذلك يجب الانتباه الى اختيار الطريقة الأمثل لفحص الجزء المعين اعتماداً على خواص الجزء و مزايا الطريقة او حسب توصية المصمم إن وجدت. وبما أن لكل تقنيةٍ من تقنيات الفحوص اللا اتلافية مزايا ومثالب، كما ذكرنا للتو، فهي قد تصلح لبعض المواد ولا تصلح لموادٍ أخرى او قد تصلح لنوع معينٍ من العيوب ولا تصلح لعيوبٍ أخرى وهكذا . لذلك من المفروض بالفاحص الإطلاع على أغلب ان لم يكن كل طرائق الفحص وخصوصاً المألوف منها، ليتسنى له اختيار الطريقة الأمثل لفحص الجزء او المنتوج المطلوب، وذلك لتلافي الهدر في الوقت والمال اضافة الى الحصول على المعلومات المطلوبة وبالدقة المتوخاة. ومن الجدير بالذكر ان لخبرة الفاحص أثر فاعل في تحليل النتائج ومن ثم البت في صلاحية الجزء او عدمه، لذلك كان للتدريب و الممارسة الدور الكبير في عملية الفحص اللا اتلافي بشكل عام.

اما الغاية من الفحوصات اللا اتلافية فأهمها:

١- المحافظة على سلامة المنتوج والسيطرة على نوعيته.

٢- المحافظة على سلامة العاملين او من لهم علاقة بذلك والأدوات و حتى سلامة المنشآت والمباني.

٣- توفير الأموال والمواد بصورة عامة.

يعتبر الجدول (١-١) كدليل الى الفحوصات اللا إتلافية الشائعة.

### ١-٤-١ طريقة المعاينة البصرية:

ان أهم وسيلة في الفحوصات اللا إتلافية هي العين البشرية ولذا تكون الأدوات البصرية المساعدة هنا من الأهمية بمكان.

تتباين هذه الأدوات من مرايا صغيرة مثبتة على ذراع نحيف (كتلك التي

## جدول ١-١ الدليل الى الفحوص اللا إتلافية

| التقنية | متطلبات التحقيق | الكلفة الكلية للجهاز | كلفة الفحص | الملاحظات |
|---|---|---|---|---|
| المعاينة البصرية | بالإمكان استخدامها لرؤية دواخل الأجهزة المعقدة ، يكفي لهذا الغرض مكان واحد يوصل الى الداخل. | B/D | D | متعددة الاستخدام بكثرة ، تتطلب مهارة قليلة، تؤخذ في الاعتبار متطلباتها عند التصميم. |
| الشعاعية | يجب الوصول الى جانبي الجزء. | A | B/C | بالرغم من ارتفاع الكلفة ، يمكن فحص مساحة كبيرة آنياً، تتطلب مهاره متوسطة عند تحليل الصوره. |
| السوائل المتغلغة | ان تكون العيوب على اتصال مع السوائل النافذة (أي انها نظيفة عند السطح) | D | C/D | تصلح لكل المواد عدا مسامية القوام وللشقوق السطحية فقط، تتطلب بعض المهاره وهي ملوثة نسبياً. |
| التيارات الدوامة | يجب ان يكون السطح في العادة ناعم ونظيف نسبياً | B/C | C/D | تصلح للتشققات السطحية او العيوب القريبة من السطح، والتغيير في سمك طبقات الطلاء والمقارنة بين المواد، اما فيما عدا ذلك فتتطلب مهارة نسبية. |
| الدقائق المغناطيسية | تتطلب سطح ناعم ونظيف بصورة مقبولة. | D | C/D | تصلح للمواد المغناطيسية فقط كالفولاذ، وللعيوب السطحية والقريبة من السطح، تتطلب مهارة قليلة. |
| الموجات فوق السمعية | ممكنة عند الوصول الى جانب او كلا الجانبين او النهايتين. | B | B/C | تتطلب فحص نقطة فنقطة، لذلك تكون ذات كلفة عالية عند فحص التراكيب الكبيرة، تتطلب مهارة وخبرة عند الفاحص. |

ملاحظة: ان الكلف المشار اليها بالحروف A و B و C و D تعتبر مؤشرات تقريبية وهي :

A اكثر من 20000 دولاراً امريكياً و B بين 4000 الى 20000 دولاراً امريكياً و C بين 400 الى 4000 دولاراً امريكياً و D اقل من 400 دولاراً أمريكياً.

يستخدمها أطباء الأسنان) الى كاميرات مسيطر عليها آليا ، حيث أن قسماً منها ذو قطر أقل من 15 ملم ويمكن ادخالها من خلال فتحات الأنابيب الصغيرة لفحص السطوح الداخلية للتجاويف، شكل 1-1 .

تكمن أهمية الأدوات الضوئية هذه في قابليتها على فحص بعض السطوح التي من دونها قد يكون الوصول اليها صعباً جداً. وتتضمن الأمثلة على الفحص بهذه التقنية مايأتي:

أ- ريش التوربين او مافي دواخل الجهاز الحارق في الطائرات او المحركات النفاثة في السفن.

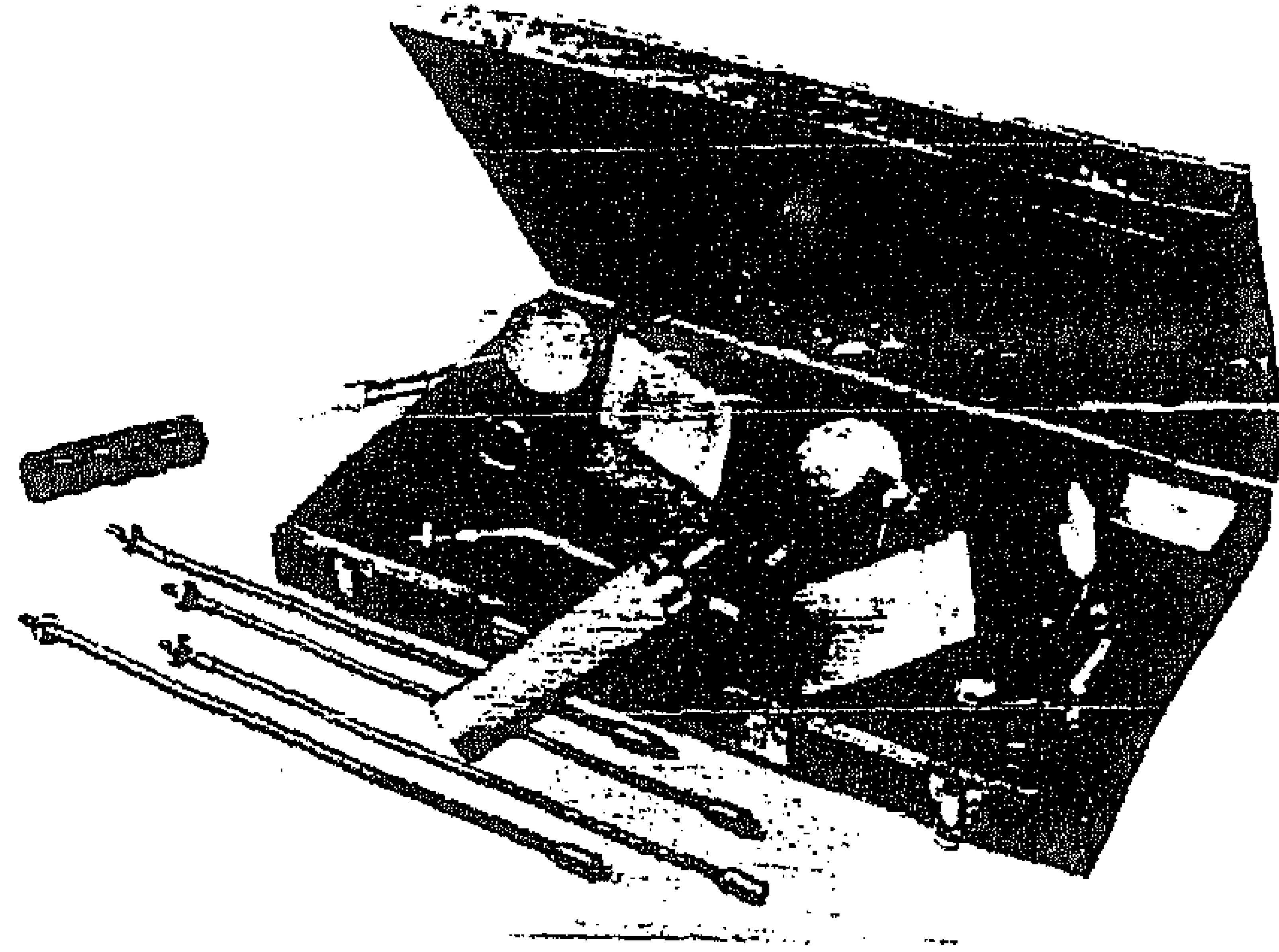
ب- رؤوس الإسطوانات وصمامات محركات الاحتراق الداخلي.

جـ- تجاويف انابيب المراجل.

يمكن توفير الوقت وتجنب الازعاج عند فتح دواخل المكائن (الأجهزة) وفحصها إضافة الى فائدة أخرى وهي قلة دقائق الحطام التي تدخل الى الماكنة عند الفحص من خلال فتحة فحص على العكس مما لو أزيل كامل غطاء الماكنة.

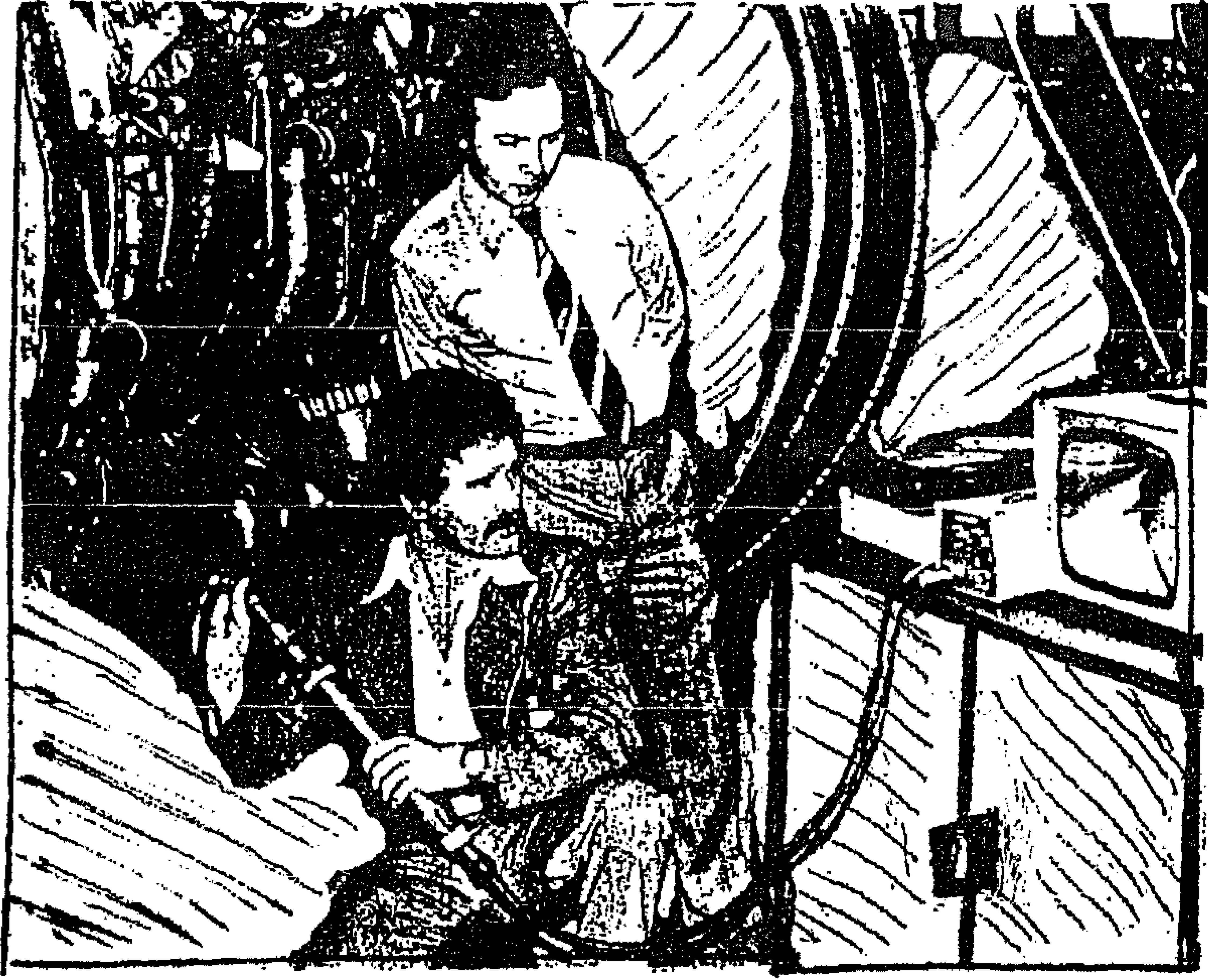
يمكن إنجاز المطلوب باستخدام مجموعة من الأذرع والمرايا والتي قد يصل طولها في الغالب الى 40 سم ويمكن امرارها حول الإنحناءات البسيطة ، وإذا تطلّب الامر مقداراً من التكبير للفحص أو أنه لم يكن الوصول الى كل المناطق المراد فحصها بواسطة مجموعة اذرع المرآة البسيطة فإن هناك أدوات أكثر تطوراً وتعقيداً تلائم معظم الحالات.

تتوفر أجهزة رؤية متينه تدعى اندوسكوب "endoscopes" . يبلغ قطرها بين 5-10 ملم وطولها من 150 ملم الى 1 m ، وذلك بوصل عدد من هذه الأدوات مع بعضها. يمكن تبديل العدسات في نهاية الأداة للنظر الى الأمام او الخلف أو الجانب. وبالإمكان استخدام هذه الأدوات مع العين المجردة وبواسطة آلة التصوير (الكاميرا) السينمائية او التلفازية. يمكن ايصال الاضاءة من المصباح الصغير قرب العدسة العينية الى الشيئية أوا لمرآة عند الرأس بواسطة زجاج بلاستيكي او خلال حزمة من



شكل 1-1 مجموعة عتلات المرآة البسيطة

الألياف الضوئية (الزجاجية) حيث يمكن عندئذٍ السيطرة على اتجاه النظر من العدسة العينية والتي منها يمكن أيضاً إمالة او ادارة النهاية لتوجيهها الى الأجزاء المعقدة من الجهاز المفحوص. كما أمكن ، في تطوير آخر لهذه التقنية، قسمة الألياف الضوئية الى مجموعتين أحدهما تخصص لنقل الإضاءة والأخرى لنقل الصورة ومن ثم تسجيلها على لوح ضوئي (فوتوغرافي) أو شاشة تلفازية أو أية وسيلةٍ أخرى (الشكل 1-2). إلا أن كل الأدوات التي تساعد على النظر من بعيد تعاني من بعض العيوب او القصور وذلك لأن من الصعب التفريق بين التنقرات والبثور (الحبابة) مالم يتم عمل تظليل للسطح باستخدام مادة معينة ليتمكن الناظر (الفاحص) من تقييم اتجاه الضوء الساقط ومن ثم ماهية او تضاريس السطح بشكلٍ عام. هناك بعض العوامل المهمة التي يجب مراعاتها عند الفحص بالمعاينة البصرية وهي:



شكل 1-2 الفحص بمجس الألياف الضوئية وبالإستعانة بالكاميرا التلفازية

أ- يجب أن تكون الإضاءة جيدة وخالية من السطوع او التوهج.

ب- يجب استخدام قدرة تكبير معقولة نسبة الى مساحة الجزء المراد فحصه. فقدرة تكبير اكثر من حوالي عشرة مرات يجب ان تستخدم باحتراس؛ وتستعمل قدرة تكبير اعلى لفحص العيب الذي عيّن مكانه مسبقاً وليس لإيجاد العيب نفسه.

جـ- ان التباين الجيد بين العيوب وأساس المادة شيء ضروري (وربما يساعد في ذلك الاظهار الملائم "Suitable etching" .

د- يجب ان تتوفر تسهيلات لمداولة وأسناد الأجزاء الثقيلة.

هـ- يجب أن يكون الشخص الفاحص قادراً على الاشتغال بارتياح وبدون انفعال او انزعاج بدني.

و- تحصل في بعض الأحيان عواقب مخيبة الآمال عندما لايمكن الانتباه بوضوح الى العيوب الموجودة.

## ٢-٤-١ طريقة السوائل المتغلغلة Liguid penetrant Technique

وقد تكون هذه الطريقة من أقدم الطرائق وأبسطها فقد كان يستخدم فيها زيت المحركات المستهلك كسائل نافذ ومسحوق الطباشير، على سبيل المثال، كمادة مظهره، وفي سنة ١٩٤١ طوّرت هذه الطريقة، فقد تمت الاستعاضة عن الزيت بمحاليل ملونة وذات مواصفات فيزياوية و كيماوية خاصة وفي بعض الحالات محاليل متألقة أيضاً وحسب طبيعة العيب. وقد استخدمت هذه التقنية بصوره واسعة في فحص مختلف المنتوجات و لمواد متعددة. وبما أن هذه الطريقة تعتمد على نفوذ او تغلغل السائل الى العيوب والتشققات الموجودة في السطح، فهي اذن لا تصلح إلا للعيوب السطحية فقط (أي التي لها فتحات عند السطح) . لكن هذه الطريقة تمتاز بكونها تصلح لجميع المواد والمعادن، عدا المواد المسامية القوام كالخشب والفخاريات. تصلح هذه الطريقة لكشف الشقوق والمسامات والطيات وعيوب اللحام كما يمكن فحص مناطق التسرب في الأنابيب والخزانات الى غير ذلك من العيوب السطحية . أما العيوب الداخلية او القريبة من السطح (التي ليس لها منفذ الى السطح) فلا يمكن فحصها بهذه الطريقة.

يمكن تلخيص أسس الفحص وهي كالآتي:

١- تنظيف السطح من كل عائق كالأتربة والزيوت والدهون وغيرها.

٢- تسليط او رش السائل الملون النافذ على السطح المراد فحصه.

٣- الانتظار فترة من الزمن تتراوح بين 5-60 دقيقة ليتمكن السائل من التغلغل داخل العيوب من خلال الفتحات الموجودة في السطح. والجدول (1-2) يبين الوقت اللازم لمختلف العيوب والمواد.

٤- ازالة الفائض من السائل عن السطح.

٥- تسليط او رش مسحوق فاتح اللون (أبيض في الغالب) مغاير للون السائل ويسمى بالمظهر. وهذا المظهر سيمتص السائل المتخلف في العيوب ويسحبه نحو

## جدول (1-2) فترة الانتظار لتغلغل السائل المتألق

### أ- للسوائل القابله للذوبان في الماء

| المادة | هيئتها | نوع العيوب | زمن التغلغل بالدقيقة |
|---|---|---|---|
| الألمنيوم | مصبوبات | مسامية وعدم التلاحم | 5-15 |
| | مطروقات | الثنيات | 30 |
| | ملحومات | عدم تامية الترابط والمسامية | 30 |
| | كل الهيئات | شقوق الكلال | 30 |
| المغنيسيوم | مصبوبات | مسامية وعدم التلاحم | 15 |
| | ومطروقات | ثنيات | 30 |
| | ملحومات | عدم تامية الترابط والمسامية | 30 |
| | كل الهيئات | شقوق الكلال | 30 |
| الفولاذ المقاوم للصدأ | مصبوبات | مسامية وعدم التلاحم | 30 |
| | مطروقات | ثنيات | 60 |
| | ملحومات | عدم تامية الترابط والمسامية | 60 |
| | كل الهيئات | شقوق الكلال | 30 |
| الشبه(Brass) والبرونز | مصبوبات | مسامية وعدم تلاحم | 10 |
| | مطروقات | ثنيات | 30 |
| | الاجزاء الملحومة بالشبة | عدم تامية الترابط والمسامية | 15 |
| | كل الهيئات | شقوق الكلال | 30 |
| اللدائن | كل الهيئات | شقوق | 30-5 |
| الزجاجيات | كل الهيئات | شقوق | 30-5 |
| ادوات القطع ذات الرؤوس الكاربيديه | | عدم تامية الترابط والمسامية | 30 |
| | | شقوق التنعيم | 10 |
| التيتانيوم والسبائك المقاومة لدرجات الحرارة العالية | | | تستخدم فقط مع السوائل غير القابلة للذوبان في الماء) بعد عملية الاستحلاب |

جدول (1-2) فترة الانتظار لتغلغل السائل المتألق
ب- للسوائل غير القابله للذوبان في الماء إلا بعد عملية الاستحلاب

| المادة | هيئتها | نوع العيوب | زمن التغلغل بالدقيقة |
|---|---|---|---|
| الألمنيوم | مصبوبات | مسامية وعدم التلاحم | 5 |
| | مطروقات | الثنيات | 10 |
| | ملحومات | عدم تمامية الترابط والمسامية | 5 |
| | كل الهيئات | شقوق الكلال | 10 |
| المغنيسيوم | مصبوبات | مسامية وعدم التلاحم | 5 |
| | ملحومات | عدم تمامية الترابط والمسامية | 10 |
| | مطروقات | ثنيات | 10 |
| | كل الهيئات | شقوق الكلال | 10 |
| الفولاذ المقاوم للصدأ | مصبوبات | مسامية وعدم تلاحم | 10 |
| | مطروقات | ثنيات | 10 |
| | ملحومات | عدم تمامية الترابط والمسامية | 20 |
| | كل الهيئات | شقوق الكلال | 20 |
| الشبه والبرونز | مصبوبات | مسامية وعدم تلاحم | 5 |
| | مطروقات | ثنيات | 10 |
| | اللحومات بالشبة | عدم تمامية الترابط ومسامية | 10 |
| | كل الهيئات | شقوق الكلال | 10 |
| اللدائن | كل الهيئات | شقوق | 2 |
| زجاج | كل الهيئات | شقوق | 5 |
| ادوات القطع ذات الرؤوس الكاربيديه | | عدم تمامية في الترابط والمسامية | 5 |
| | | شقوق التنعيم | 20 |
| التيتانيوم والسبائك المقاومة لدرجات الحرارة العالية | | كل العيوب | 30-20 |

ملاحظة: عندما تكون سرعة الفحص غير مهمة، فمن المفضل ألا يكون زمن التغلغل اقل من ١٥ دقيقة. استخدام هذا الزمن سيجعل بالإمكان سحب أقصى كمية من السائل المتغلغل في العيوب، اضافة الى منعه لتلوث المستحلب مع السائل المتغلغل.

السطح بواسطة الخاصية الشعرية . وبذلك ترتسم صور العيوب في المظهر ولكن بشكلٍ اكبر بكثير من الحجم الحقيقي للعيب.

٦- ملاحظة هذه العيوب وتعيين شكلها ومكانها ومن ثم تحديد رفض او قبول هذا المنتوج حسب نوع العيب ومكانه وشكله. لأنه ليس من الضروري رفض كل منتوج فيه عيب فهناك عيوب مقبولة عند تواجدها في بعض المنتجات اي عندما لايؤثر وجودها على العمل المصممة من أجله تلك المنتجات.

**أنواع وخواص السوائل النافذة والمساحيق المظهره:**

يمكن القول بأن أغلب السوائل تدخل او تتغلغل الى أغلب العيوب السطحية تبعاً لسعة فتحة العيب، وأن كل المساحيق ذات الألوان الفاتحة والحبيبات الناعمة تصلح أن تكون مساحيق مظهره وذلك عندما تكون فتحات العيوب السطحية كبيرة نسبياً. إلا أن تحقيق حساسية عالية وخصوصاً للفتحات الصغيرة جداً يتطلب سوائل ذات قدرة عالية على النفوذ وذات صبغة داكنة (غامقة) لتعطينا تبايناً عند وضع المسحوق المظهر. وتجدر الملاحظة بأن كمية المحلول التي ستدخل الى العيوب الصغيرة جداً ستكون قليلة أيضاً لذلك من المفروض استخدام مساحيق مظهره (ذات قابلية امتصاص عالية) لإمتصاص أكبر كمية ممكنة من السائل الداخل الى العيب ليمكن رؤيته بوضوح اما تحت الضوء الأبيض (الإعتيادي) او تحت الضوء الأسود (الذي هو الجزء الأطول من طيف الأشعة فوق البنفسجية والذي يقدّر طوله الموجي بحوالي 360 نانوميتر) إذا كان السائل المتغلغل متألقاً (Fluorescent) .

تقسم السوائل النافذة الى نوعين:

أ- السوائل المتألقة تحت الضوء الأسود.

ب- السوائل التي تبدي تبايناً لونياً تحت الضوء الأبيض.

أما التصنيف الآخر فحسب كيفية ازالتها من سطح النموذج المراد فحصه فالمجموعة الأولى هي التي يمكن إزالتها بالماء او ببعض المذيبات بسهولة، أما المجموعة الثانية فهي السوائل التي لايمكن إزالتها بالماء بحد ذاتها لكنها تزال بالماء

بسهولة بعد وضع بعض المستحلبات عليها حيث تتفاعل مع الزائد من السائل ويتم ذلك بعد عملية تغلغل السائل الى العيوب طبعاً.

يمكن تقسيم المظهرات الى نوعين أيضاً

أ- المظهرات الجافة، وهي مساحيق ذات الوان فاتحة وطريقة استخدامها هي أما ان يغمر الجزء المراد فحصه في وعاء يحتوي على المسحوق او أن تتم تذرية المسحوق على الجزء بواسطة منفاخ هوائي ومن الممكن أيضاً استعمال فرشاة ناعمه وذلك بغمرها في المسحوق ثم طلاء الجزء به.

ب- المظهرات الرطبة وفي هذه الطريقة يكون المسحوق عالقاً في سائل ما كالماء او بعض السوائل المتطايرة وقد يكون على هيئة رذاذ (Spray). ومن ميزات النوع الرطب أنه يمكن استخدامه لأعداد كبيرة من الأجزاء وحتى الأشكال المعقدة ، إلا أنه يجب تجفيف الجزء المفحوص بواسطة تيار من الهواء الحار خصوصاً اذا كان المسحوق عالقاً في الماء اما بالنسبة الى السوائل الطيارة فالحاجة الى التجفيف بالهواء الحار قليله.

يمكن ترتيب خطوات العمل كالآتي:

١- تنظيف السطح بصوره جيدة وإزالة جميع قشور الصدأ والأملاح والأصباغ و الشحوم والزيوت والأتربة وما الى ذلك من المواد التي تعيق السائل من النفوذ الى داخل الشقوق والعيوب الأخرى ، يتم ذلك بالمزيلات المعروفة كالماء وبعض الحوامض والقواعد والكحول والاسيتون ورابع كلوريد الكاربون وغيرها.

٢- تسليط السائل النافذ على الجزء المراد فحصه ويتم ذلك اما بغمر الجزء في وعاء يحتوي على السائل او رش الجزء بالسائل وفي أحيانٍ قليلة تستخدم الفرشاة لطلي الجزء بالسائل، كما في الشكل 1-3.

٣- الإنتظار فترة من الزمن ليتغلغل السائل داخل العيوب ،وتعتمد هذه الفترة على :

أ- نوع السائل المستخدم.

ب- نوع وحالة المادة المفحوصة.

جـ- الحساسية المطلوبة.

د- نوع العيب المبحوث عنه.

تتراوح هذه الفترة بين خمسة دقائق الى ساعة واحدة وفي خلال هذه الفترة يترك المنتوج جانباً حيث يمكن استغلال الوقت في أعمال أخرى. والجدول 1-2 يبين فترة الإنتظار للسوائل المتألقة على سبيل المثال،

٤- إزالة السائل الفائض إما بغسله بالماء او بالمزيلات الاخرى ويمكن انجاز ذلك بقطعة قماش ميللة إذا كان السطح ناعماً، الشكل 1-4 .

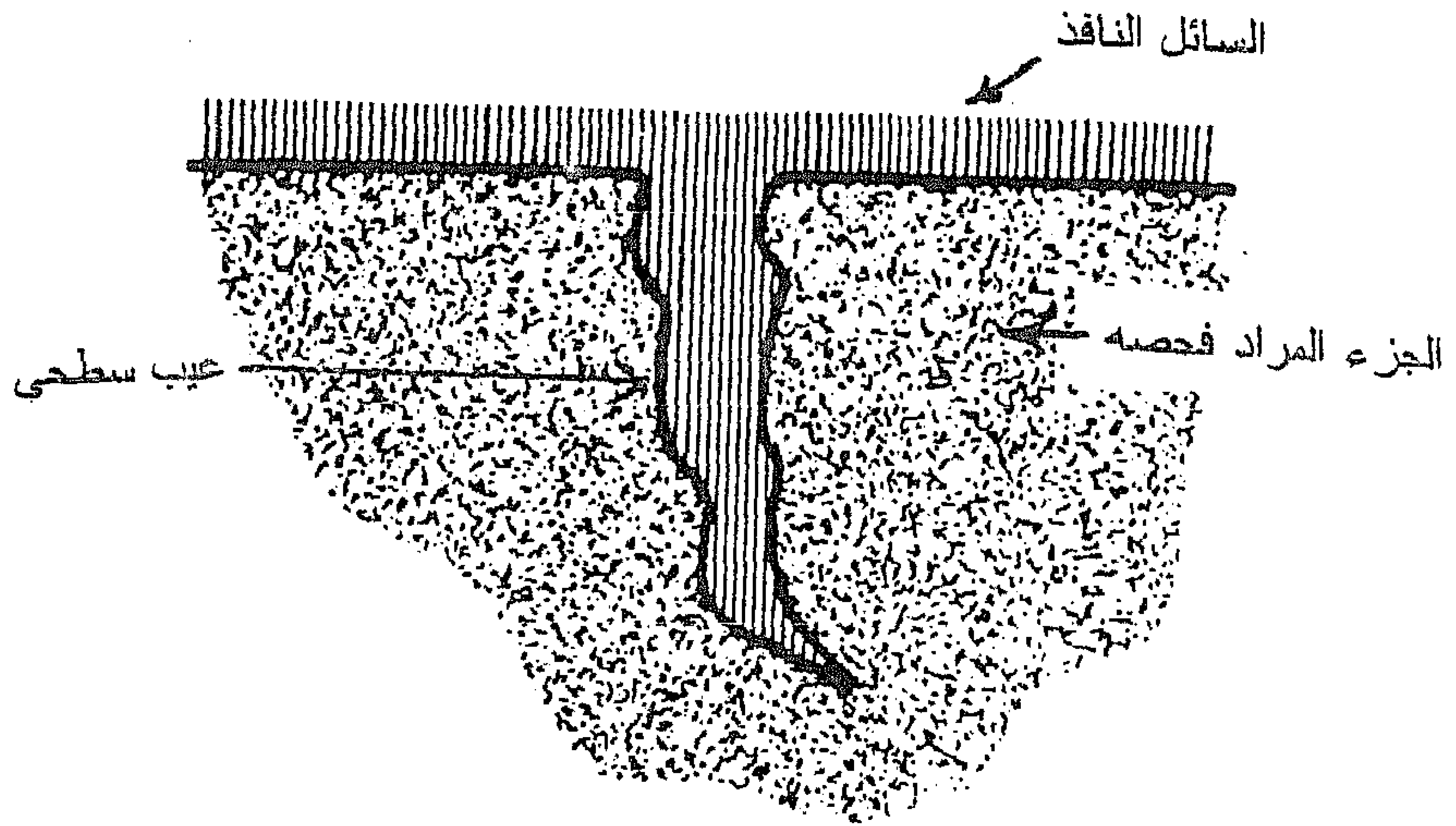
٥- تسليط او طلاء السطح بالمسحوق المظهر والذي يعمل على امتصاص السائل المتغلغل في العيوب وسحبه الى السطح لتتلوث المنطقة به حيث ترتسم معالم العيوب الموجودة، وبصورة مكبره، على المسحوق الذي له لون ابيض او فاتح مغاير للون السائل الذي يكون ذو لون أحمر غامق أو أخضر.. الشكل 1-5.

يستحسن الانتظار فترة تساوي تقريباً فترة الانتظار لتغلغل السائل داخل العيوب وذلك لترتسم معالم العيوب في المظهر بصورة جيدة.

٦- فحص الأشكال والمعالم التي رسمت جرّاء امتصاص السائل الملون من قبل المادة المظهرة. فإذا كان السائل ملوّن باللون المرئي فيمكن فحصه تحت الضوء الأبيض الاعتيادي او تحت الضوء الأسود إذا كان السائل متألقاً – يستخدم السائل المتألق عادةً للكشف عن العيوب الصغيرة جداً، كالشقوق الدقيقة والمسامات ، الشكل 1-6.

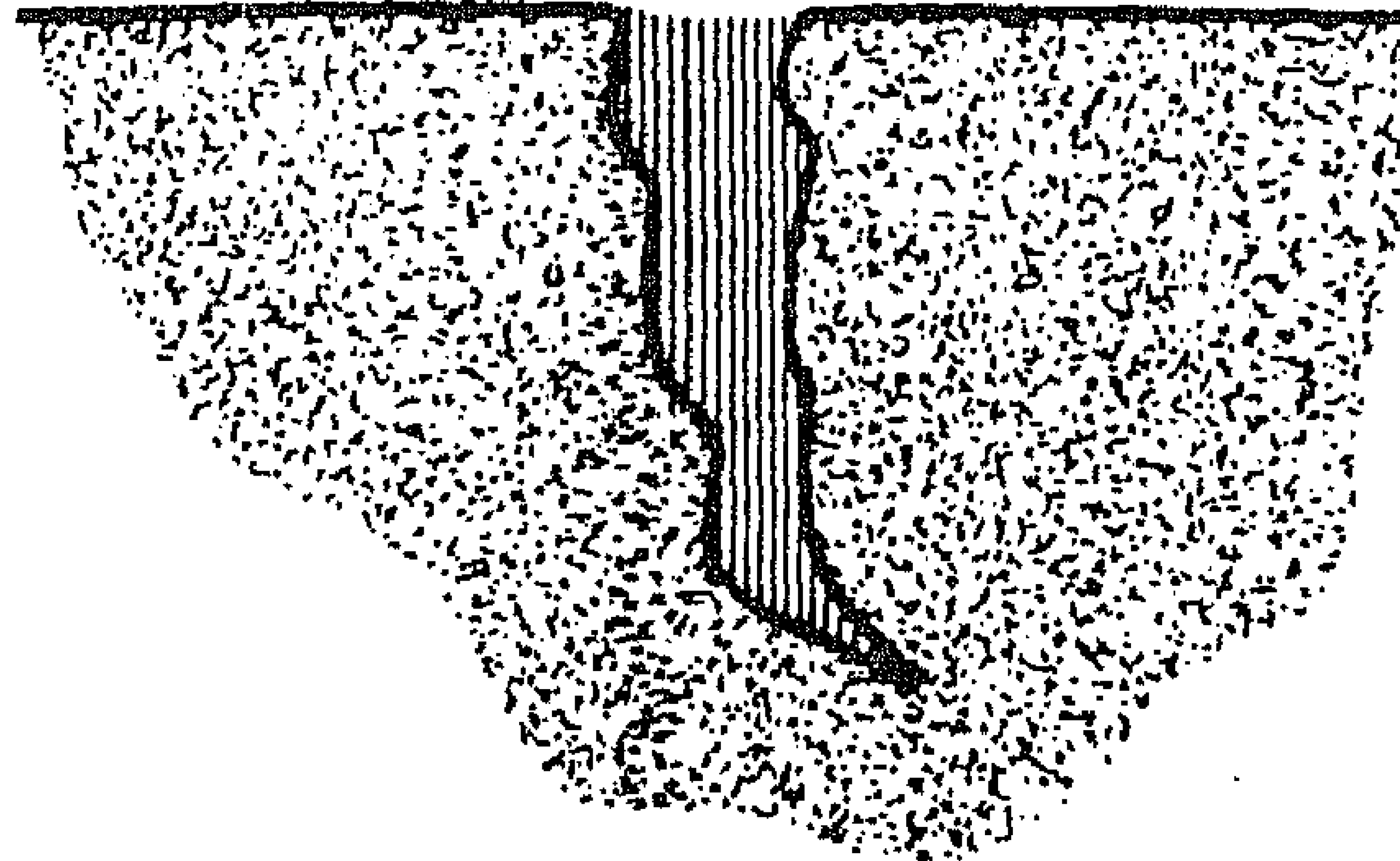
ومن المهم هنا ملاحظة مايلي:

١- يجب أن يدخل السائل النافذ الى العيب ليمكن الكشف عنه. فمن الضروري إذن ان تكون العيوب نظيفة وخالية من المواد الملوثة وإلا قد لايمكن الكشف عن العيب او قد تتفاعل هذه المواد مع السائل وتخفف لونه او تألقه كما أن من المحتمل ان تقلل هذه المواد والأوساخ من الخاصية الشعرية للسائل وبذلك تقل حساسية الكشف بهذه الطريقة.



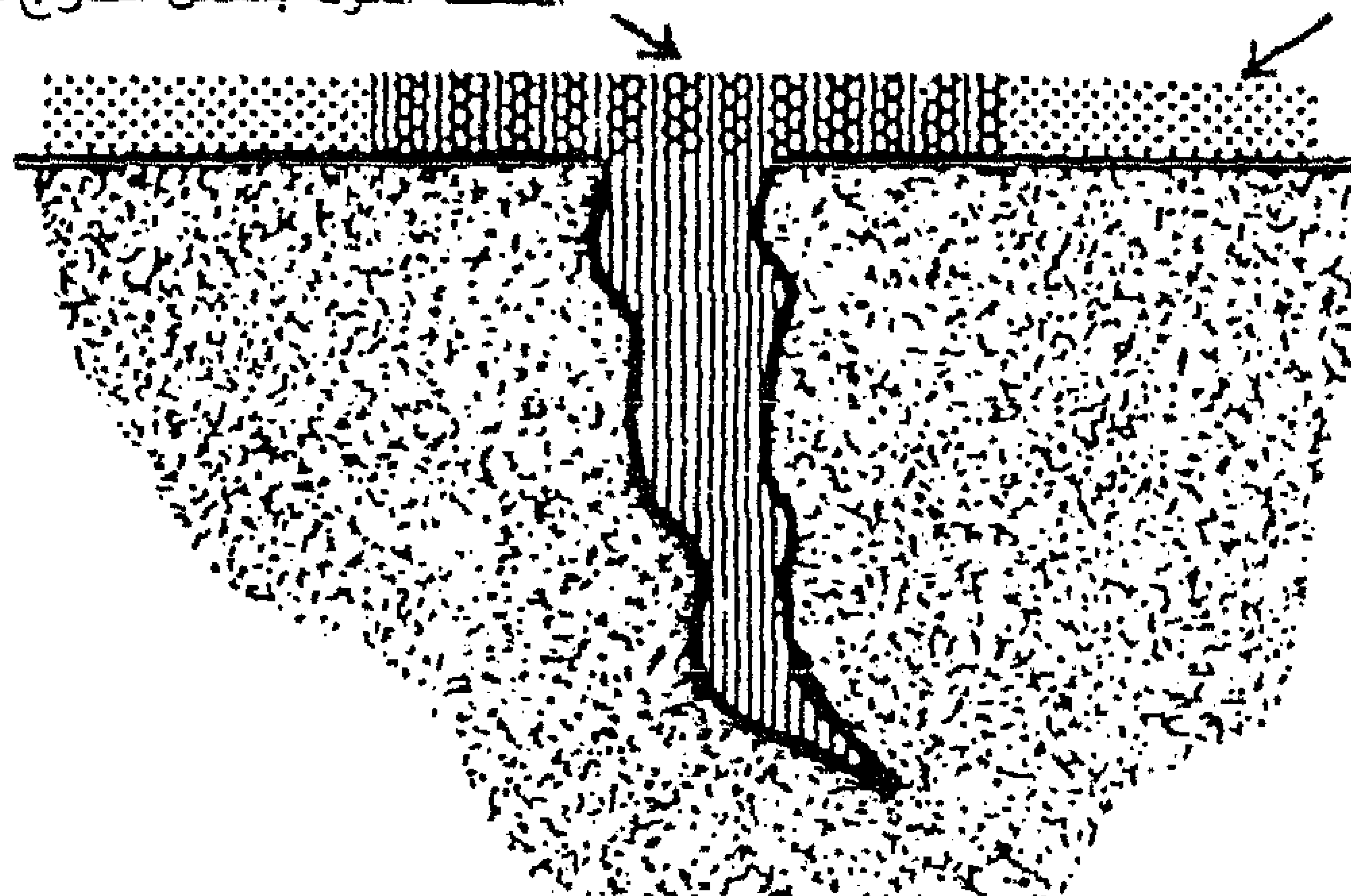

**السائل النافذ يغطي السطح وقد تغلغل داخل العيب.**

شكل 1-3

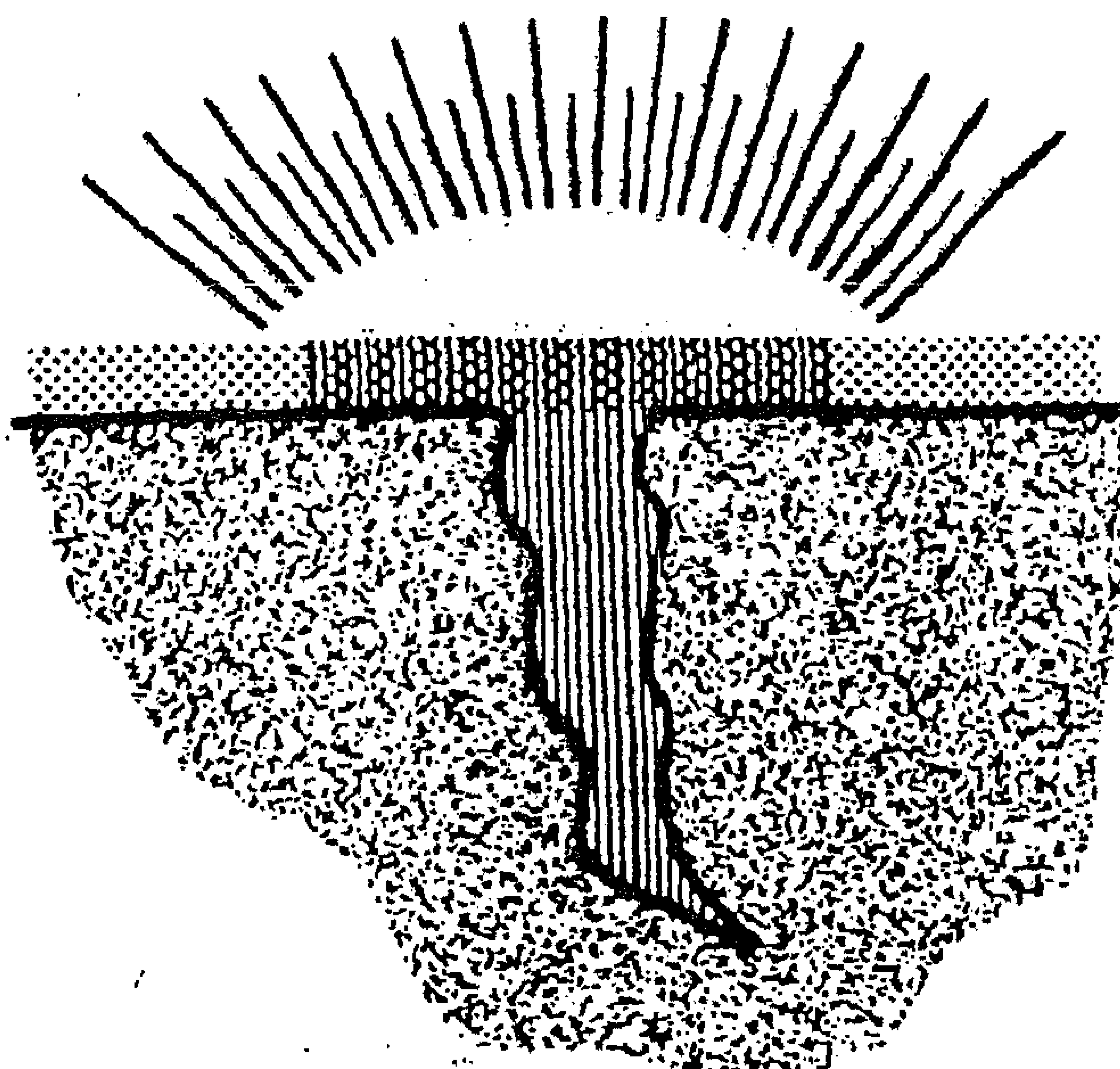


**السطح وقد تمت ازالة السائل النافذ الزائد ،**

شكل 1-4




وضع المظهر على السطح وقد عمل على امتصاص السائل النافذ واظهار علامات واشكال العيب شكل (1-5) .



الفحص تحت الضوء الأسود يحدث تالقا ملحوظا عند استعمال السوائل المتألقة وخصوصا في المكان المظلم شكل (1-6).

٢- لا يمكن إظهار العيوب إذا تمت إزالة السائل الداخل الى العيوب بتيار الماء عند غسل السطح لإزالة السائل الفائض، مع العلم أنه ليس من السهولة إزالة السائل النافذ حتى من الشقوق الضيقة وذلك لضعف قابلية الماء على النفوذ إلى الشقوق الضيقة، في حين لا يحدث ذلك في السوائل التي لا تتم إزالتها بالماء إلا إذا أضيف عليها بعض المستحلبات الخاصة.

٣- تتطلب العيوب الصغيرة والدقيقة وقتاً أطول لنفوذ السائل اليها حيث ستكون العملية أبطأ في حالة العيوب الصغيرة.

٤- يتطلب فحص العيوب العريضة ، اي التي يكون عمقها أقل من سعة فتحتها السطحية، تقنية خاصة لأن السائل النافذ سوف يزال عند غسل اوتنظيف السطح من السائل النافذ الفائض ولذلك يتوجب استخدام السوائل التي لاتذوب بالماء ثم تسليط المستحلب الخاص عليه ،وبعد التفاعل مع الفائض من السائل فستتكون مادة يمكن ازالتها بالماء بسهولة من السطح . أما السائل الداخل في العيوب فسوف يكون بعيداً عن المستحلب ولذلك سوف يبقى في العيوب غير العميقة حتى بعد غسل السطح. ومن محاسن السوائل غير الذائبة في الماء إلا باستعمال المستحلب (بعد عملية النفوذ) هي:

أ- أكثر حساسية للعيوب الدقيقة.

ب- تعطي نتائج مرضية في حالة العيوب الملوثة

جـ- يمكن كشف العيوب غير العميقة (الضحلة) كالخدوش وعلامات التشغيل ، على سبيل المثال.

## ٣-٤-١ الفحص بطريقة الدقائق المغناطيسية Magnetic Particle Testing

وهي إحدى طرائق الفحص اللا اتلافي لفحص او تحسس الخلل والعيوب الموجودة في المواد المغناطيسية على اختلاف أشكالها وحجومها. تتطلب هذه الطريقة مايلي:

١- تكوين مجال مغناطيسي ملائم في الجزء المراد فحصه.

٢- تعريض سطح الجزء المراد فحصه للدقائق المغناطيسية.

٣- فحص وملاحظة مناطق تجمع الدقائق على السطح ومن ثم تقدير صلاحية الجزء المفحوص للعمل المصمم من أجله.

تصلح هذه الطريقة لفحص العيوب السطحية والعيوب الموجودة تحت السطح مباشرة والى مدى محدود اعتماداً على الصفات المغناطيسية للجزء وشدة المجال المتولد. والطريقة ملائمة للمواد المعدنية التي يمكن مغنطتها جيداً، أما المواد غير المغناطيسية والتي لا يمكن مغنطتها بشكل جيد فلا يمكن فحصها بهذه الطريقة. ومعنى هذا أنه لايمكن فحص الألمنيوم والمغنيسيوم والنحاس الاصفر والبرونز والرصاص والتيتانيوم وغيرها من المواد غير المغناطيسية.

يلزم في هذه الطريقة ان تكون الأجزاء المفحوصة نظيفة وخالية من الدهون والأكاسيد وما شابه ذلك، حيث تعتمد هذه الطريقة على قابلية الدقائق على الحركة استجابة لتأثير المجال المغناطيسي المتسرب (Leakage Magnetic Flux) الناتج بسبب العيوب الموجودة.

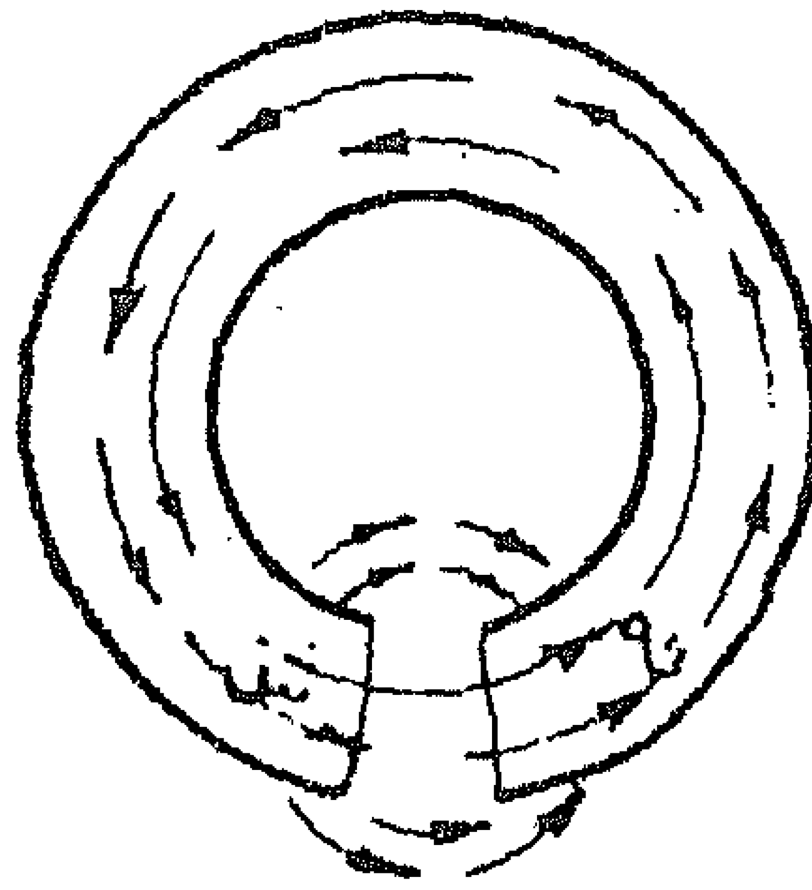
يلزم تذرية الدقائق المغناطيسية بواسطة منفاخ هوائي مطاطي صغير أثناء الفحص، في حالة الطريقة الجافة، وعندها يجب ان يكون الجزء تحت الفحص جافاً أيضاً. أما في الطريقة الرطبة، فيتم حل الدقائق، التي تكون بدورها على هيئة معجون، في سائل شفاف كالماء أو الزيت حيث تبقى عالقةً فيه، وذلك لتسهل حركة الدقائق عند تعرضها للمجال المغناطيسي.

## خواص المجال المغناطيسي Properties of Magnetic Field

من المعلوم ان المغناطيس على شكل حذاء الفرس يجذب المواد المغناطيسية الى نهايتيه (قطبيه). لقد تم فرض ان خطوط القوى المغناطيسية او الفيض تتجه من القطب الجنوبي نحو القطب الشمالي داخل المغناطيس وتخرج من القطب الشمالي لتدخل الى الجنوبي عند القطبين (خارج المغناطيس). فعند وضع قضيب من مادة

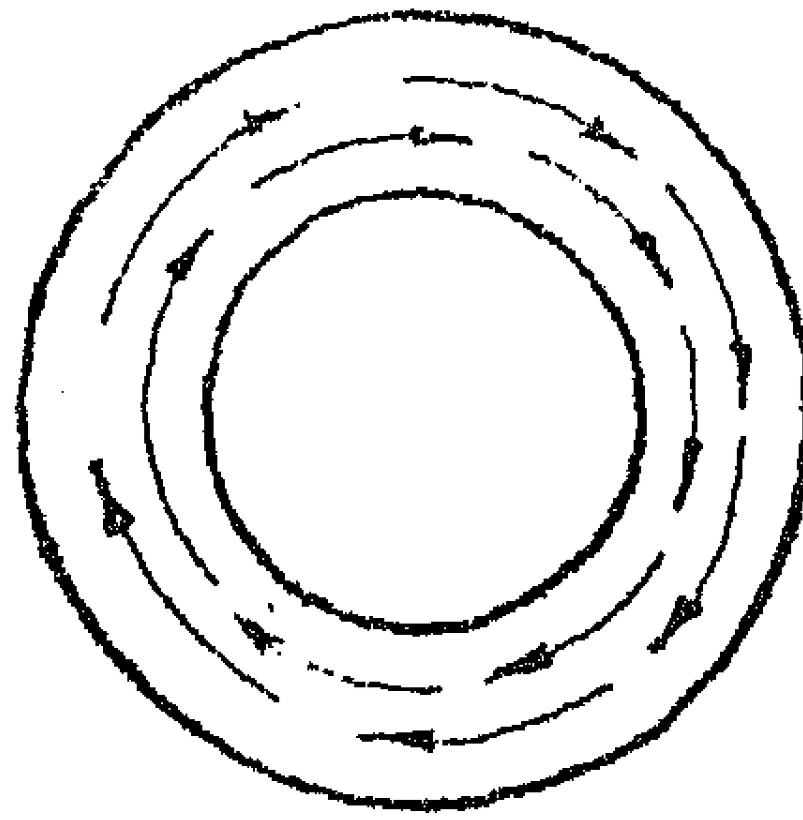
مغناطيسية (قابلة للتمغنط) ليصل بين قطبي حذاء الفرس ، فستمر كل خطوط الفيض خلال القضيب بدلاً من مروره خلال مادة غير مغناطيسية كالهواء ، على سبيل المثال، وبذلك ينجذب القضيب نحو القطبين.

يبين الشكل 1-7 مسار المجال المغناطيسي داخل حلقة ممغنطة مفتوحة (أي أن هناك فجوة بين الطرفين)، كما يبين الشكل 1-8 مسار المجال داخل حلقة ممغنطة مغلقة. يلاحظ من الشكلين كيف ان مسار الفيض المغناطيسي يتشوه عند مروره في الهواء لإكمال الدورة.



**المجال المغناطيسي في حلقة ممغنطة مفتوحة .**

شكل (1-7)

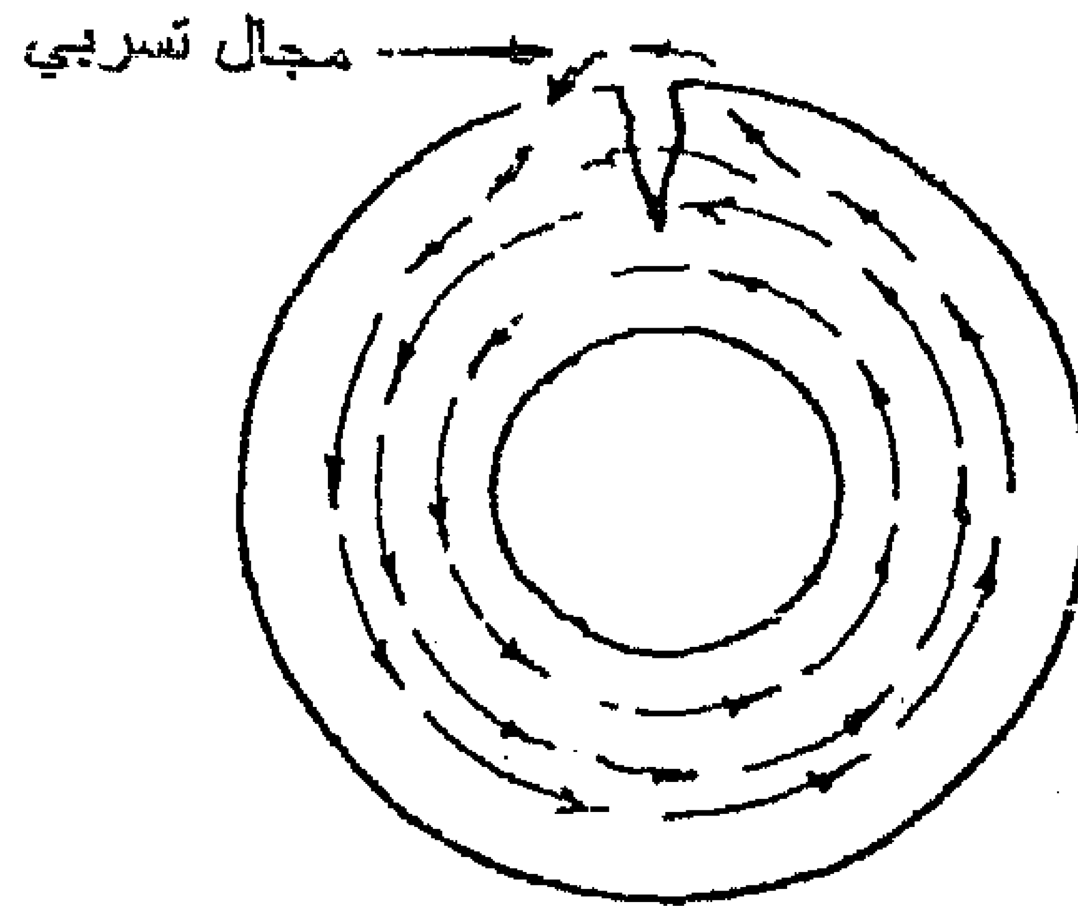


**المجال المغناطيسي في حلقة ممغنطة مغلقة .**

شكل (1-8)

### تأثير الشق او الصدع في الحلقة الممغنطة:

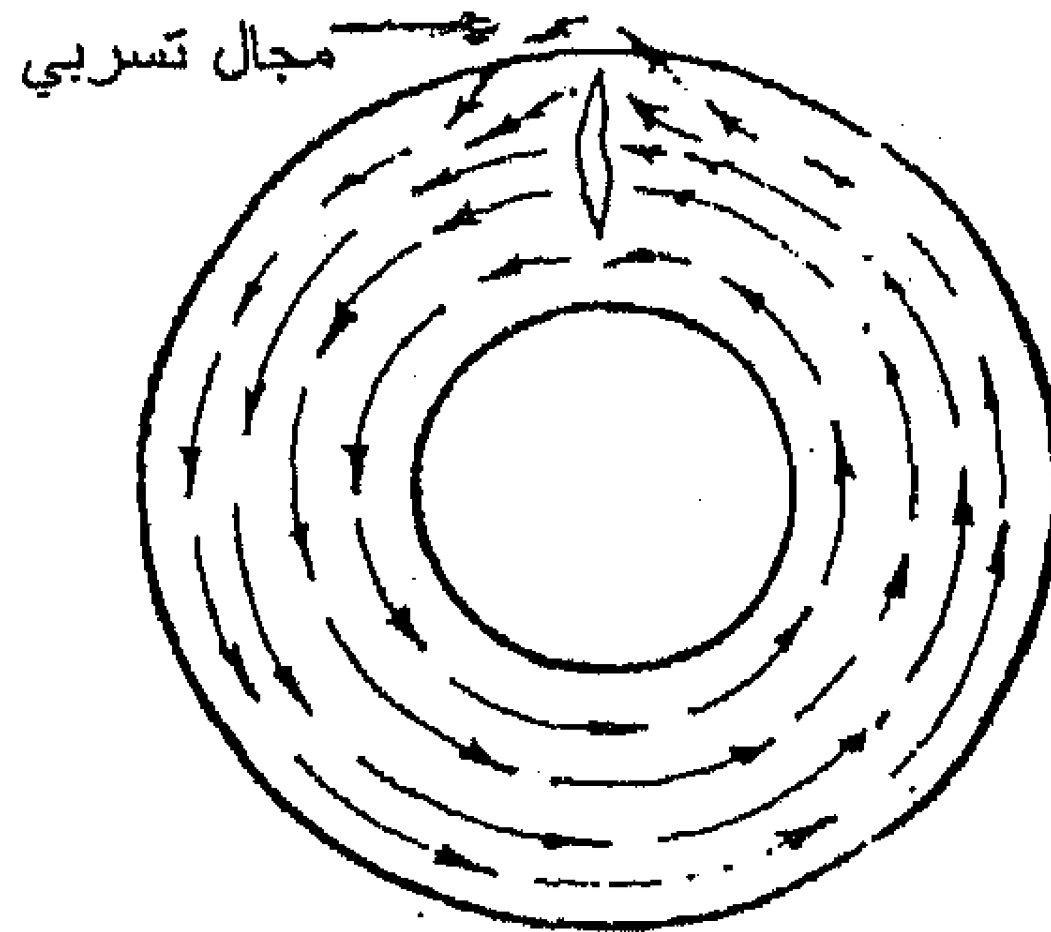
يتولد على جانبي الشق العمودي على إتجاه المجال المغناطيسي قطبان مغناطيسيان احدهما شمالي والآخر جنوبي. وهذا بدوره سوف يجعل خطوط القوى المغناطيسية تمر خارج المعدن، اي تخرج من قطبه الشمالي لتدخل الى قطبه الجنوبي، وهذا مايدعى بالفيض المتسرب. لذلك سوف تنجذب الدقائق المغناطيسية الى القطبين المتولدين على حافتي الشق لتشكل علامة ظاهرة تدلل على وجود الشق او العيب ، الشكل 1-9.




المجال المغناطيسي لحلقة ممغنطة فيها شق عمودي على اتجاه المجال

الشكل (1-9)

اما بالنسبة لوجود عيب أو اكتنافات غير معدنية (inclusions) تحت السطح فسوف تؤدي الى حدوث فيض متسرب ايضاً إلا إذا كان العيب في الداخل بعيداً عن السطح فيضمحل الفيض المتسرب (المتشوه) كلما أبتعد العيب عن السطح كما في الشكل 1-10.




المجال المغناطيسي لحلقة ممغنطة فيها

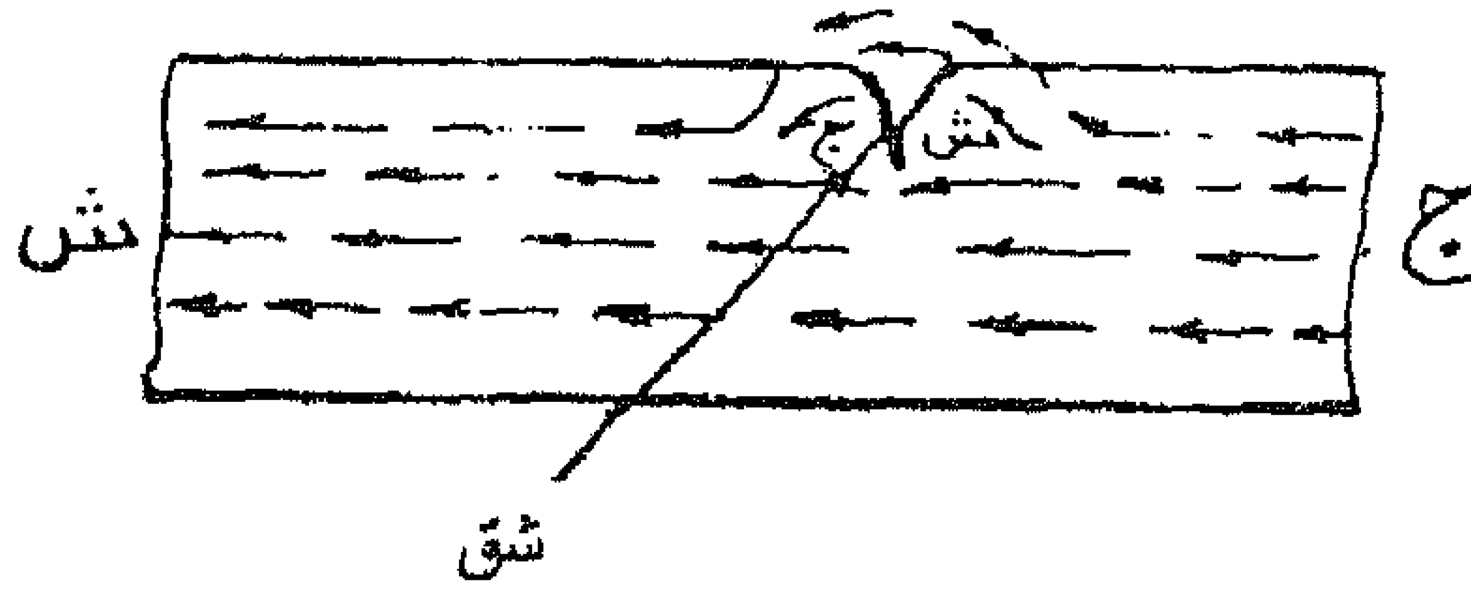
شق تحت السطح مباشرة الشكل (1-10)

### تأثير الشق في قضيب مغناطيسي:

لو تصورنا ان مغناطيس حذاء الفرس قد تم تعديله ليكون قضيباً مستقيماً فستكون خطوط القوى المغناطيسية ماره خلال القضيب وموازيه لمحوره الطولي وهذا ما يدعى بالمغنطة الطولية.

فلو حدث شق في سطح هذا القضيب المغناطيسي فسوف تتشوه مسارات خطوط القوى المغناطيسية نتيجة لذلك وسينشأ قطبان مغناطيسيان على طرفي الشق (وبشكل يشابه الشق الحاصل في الحلقة الممغنطة) وستنجذب الدقائق المغناطيسية لهذين القطبين لتدلنا على وجود شق في القضيب، الشكل 1-11 .

تعتمد شدة المجال عند هذين القطبين على عدد خطوط القوى المغناطيسية التي تقطع هذا الشق وتتأثر به بوحدة المساحة. ولذا فالشق الذي يكون عمودياً على اتجاه هذه الخطوط سوف يقطع ويؤثر من ثم على أكبر عدد ممكن منها وبذلك سيتولد قطبان مغناطيسيان أقوى من القطبين اللذين يولدهما شق مشابه للأول لكنه يوازي خطوط القوى المغناطيسية.




مجال مغناطيسي طولي في قضيب يحتوي على شق
الشكل (1-11)

اذن يكون حجم تجمع الدقائق أكبر مايمكن عندما يكون الشق عمودياً على اتجاه خطوط القوى المغناطيسية.

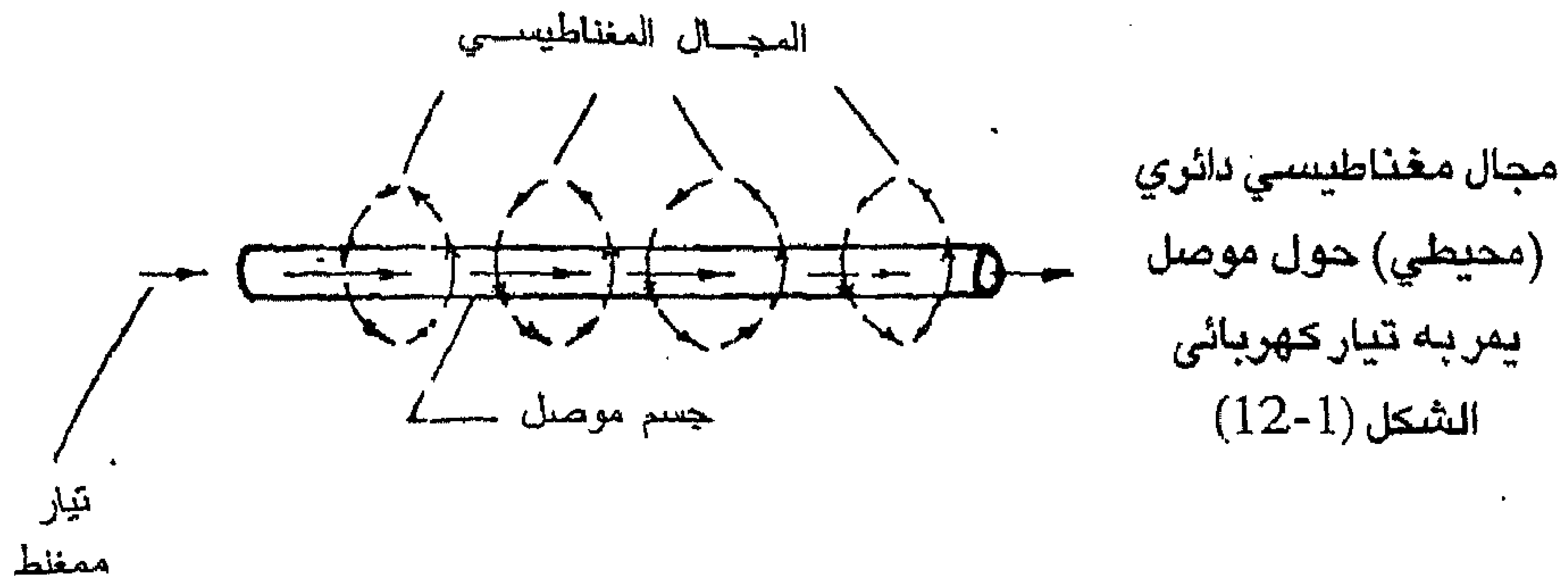
ومن الجدير بالذكر أن مقدار تكبير حجم العيب يكون بحدود 200 ضعف في هذه الطريقة، ولذا يمكن رؤية حتى العيوب الدقيقة جداً.

## التمغنط بالتيار الكهربائي:

يستخدم التيار الكهربائي عادةً لتوليد مجال مغناطيسي في المواد المغناطيسية. وبما أنه يمكن تغيير اتجاه المجال المغناطيسي بتغيير اتجاه مرور التيار الممغنط، لذا يمكن الحصول على خطوط قوى مغناطيسية عموديه على اتجاه الشق او العيب الموجود في الجزء المفحوص وذلك بتغيير اتجاه مرور التيار.

أ- التمغنط الدائري:

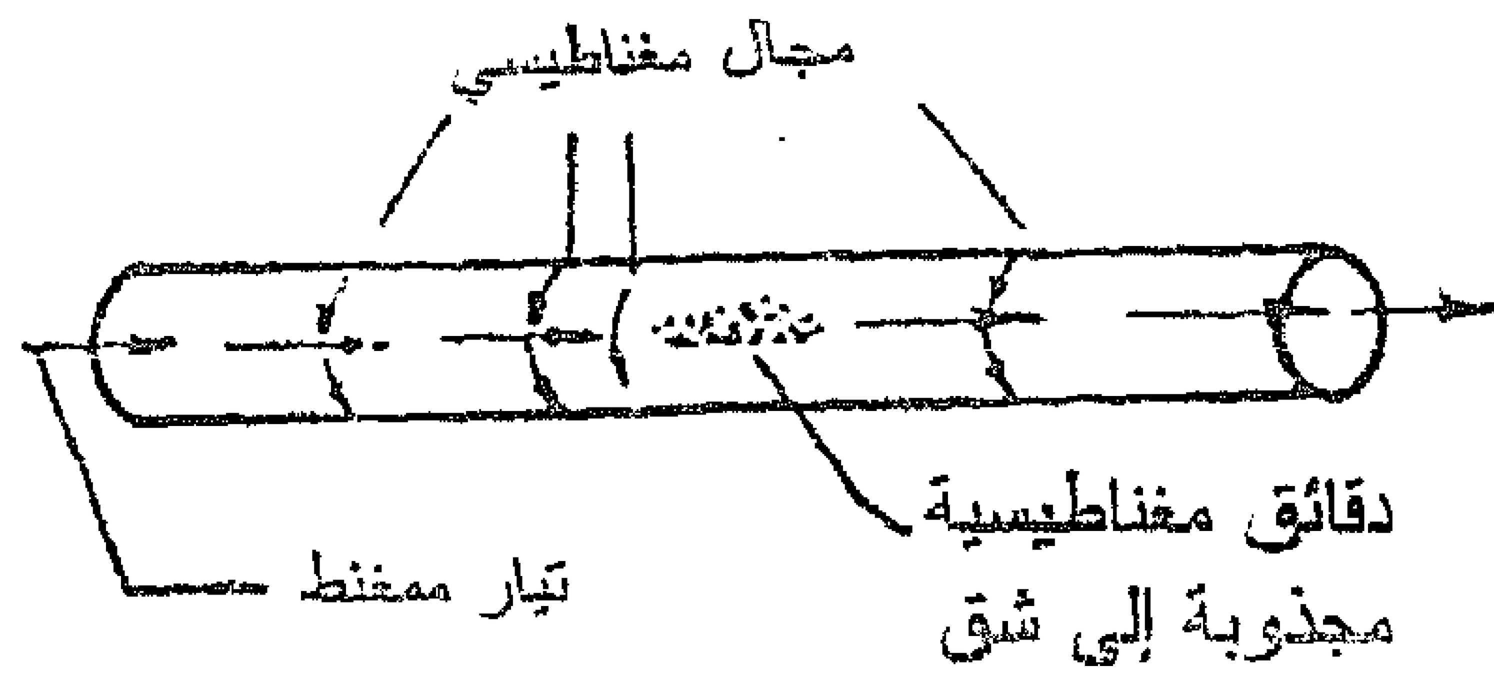
يتولد مجال مغناطيسي دائري حول الجسم الموصل المستقيم كالسلك عند مرور تيار كهربائي فيه كما في الشكل 1-12 . تكون خطوط القوى المغناطيسية (أو مستوياتها) دائماً عمودية على اتجاه التيار الذي يولد المجال المغناطيسي. وتتبع علاقة اتجاه خطوط القوى المغناطيسية باتجاه التيار قاعدة اليد اليمنى حيث يمثل الإبهام اتجاه التيار وبقية الأصابع اتجاه الخطوط المغناطيسية حول السلك. ويولد التيار المار بالجسم الموصل القابل للتمغنط مجالاً مغناطيسياً في الجسم نفسه وحوله ايضاً والى مسافة معينة منه تعتمد على شدة التيار المار و مادة الجسم. وهذا النوع من التمغنط يسمى بالتمغنط الدائري.




مجال مغناطيسي دائري (محيطي) حول موصل يمر به تيار كهربائي
الشكل (1-12)

يولد هذا النوع من التمغنط أقطاباً مغناطيسية على طرفي الشق الموازي لطول الجسم المار به التيار، كما هو موضح في لشكل 1-13 .

مجال مغناطيسي دائري بإمرار تيار كهربائي بالجسم المفحوص الشكل (1-13).




أما بالنسبة الى الأجسام المجوفة كالإسطوانات والأنابيب فمن الممكن أمرار تيار كهربائي مناسب بسلك موصل يمر في المحور وعندها يمكن فحص السطح الداخلي والخارجي نتيجة للمجال المغناطيسي الدائري المتولد في كلٍ منهما.

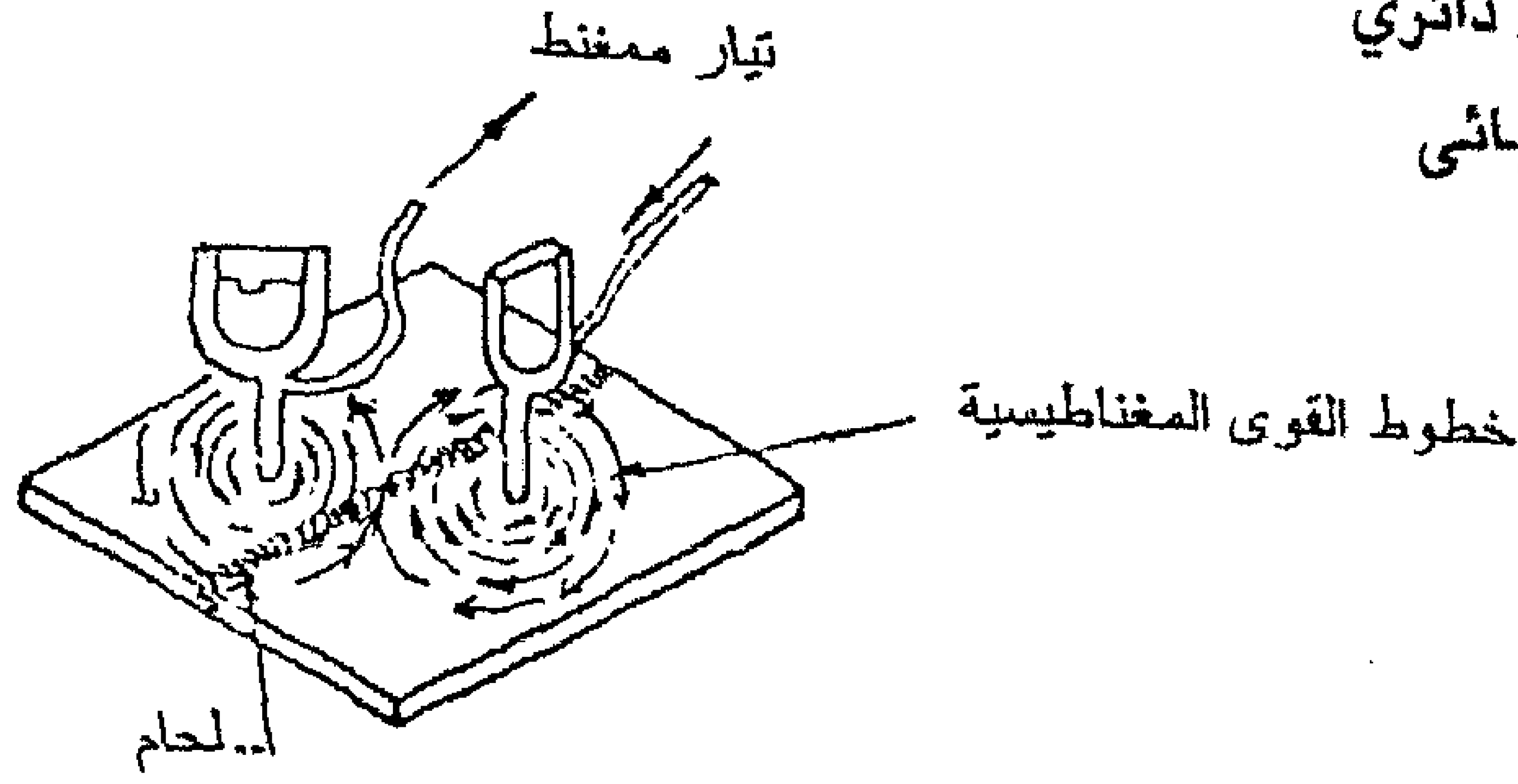
يمكن كذلك توليد مجال دائري موضعي (وغالباً ما تستخدم هذه الطريقة) لفحص الأجزاء المسطحة والكبيرة حيث يستخدم تيار عالي نسبياً (حسب حجم الجزء المفحوص) باستخدام اسلاك معزولة وأقطاب خاصة لإمرار التيار خلال منطقة الفحص، الشكل 1-14 .

ب– التمغنط الطولي:

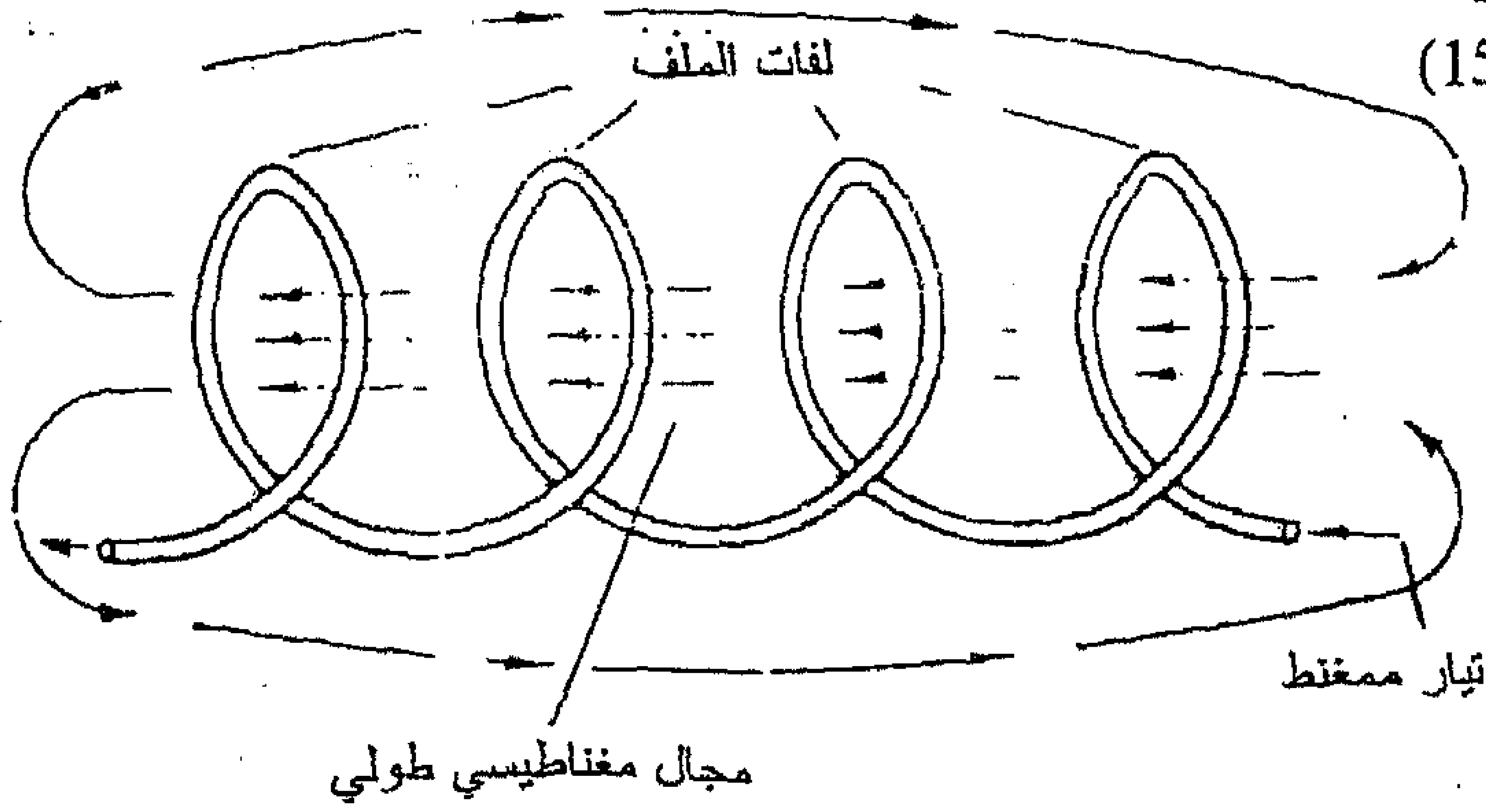
يمكن استخدام التيار الكهربائي أيضاً لتوليد المجال المغناطيسي الطولي في المواد المغناطيسية فعند مرور تيار كهربائي في ملف ذي لفات عديدة فينشأ مجال مغناطيسي طولي (موازٍ لمحور الملف) هو محصلة المجال المغناطيسي حول كل لفة من اللفات كما في الشكل 1-15 . فإذا تم وضع مادة مغناطيسية داخل الملف فستتركز خطوط القوى المغناطيسية فيها مكونة مجالاً مغناطيسياً طولياً، وإذا تواجد شق او صدع عرضي في المادة المغناطيسية (الجزء المراد فحصه) فسيكون هناك قطبان مغناطيسيان على طرفي الشق وهذا سيجذب الدقائق المغناطيسية المتناثرة مدللاً على وجود الشق، الشكل 1-16.

من المعلوم ان شكل وحجم الجزء المراد فحصه هو الذي يحدد الطريقة التي يجب استخدامها في الفحص (تمغنط طولي او عرضي). فإذا تم وضع دولاب (Wheel)

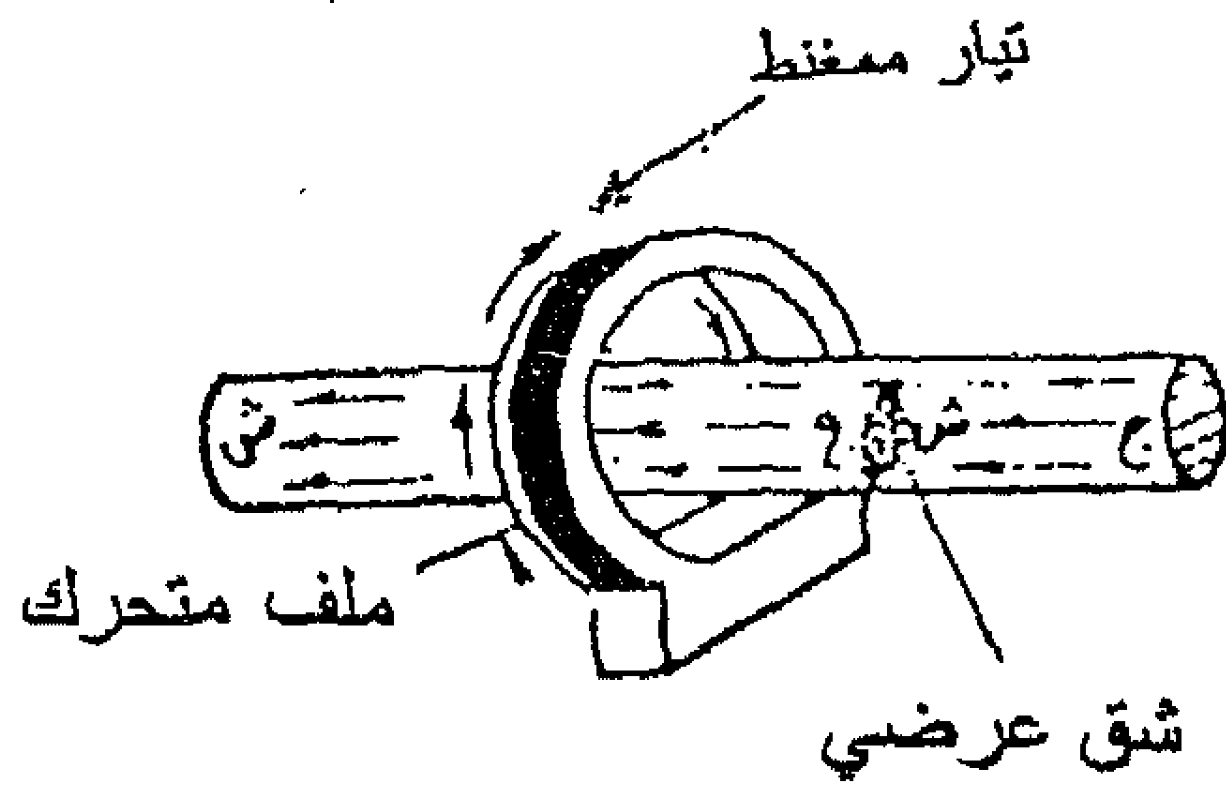
تكوين مجال مغناطيسي دائري موضعي بأمرار تيار كهربائي
الشكل (1-14)




مجال مغناطيسي طولي متولد في ملف نتيجة لمرور تيار كهربائي فيه
الشكل (1-15)




جسم موضوع في فتحة ملف يمر به تيار مناسب ويشاهد تراكم الدقائق على شق عمودي على اتجاه المجال.
الشكل (1-16)



في مركز ملف فإن العيوب القطرية في المنطقة المظللة ستظهر بوضوح في حين ستكون غير واضحة او مخفية تماماً في المناطق الأخرى نظراً لكونها موازية تقريباً للمجال المغناطيسي ولهذا يجب تدوير الدولاب بزاوية مقدارها $90^{\circ}$ ليمكن إظهار عيوب المناطق الاخرى ، كما في الشكل 1-17.

يمكن ايضاً توليد مجالاً طولياً باستخدام جهاز المقرن (اليوك Yoke) في جزء أو كل القطعة المفحوصه (وهذا الجهاز هو الأكثر شيوعاً في المختبرات). يتكون المقرن من مادة مغناطيسية لينه (Soft Magnetic Material) على شكل حرف U ، وهي إما أن تكون صلدة او صفائحية ، ملفوف حول الجزء الوسطي منه ملف يمر فيه تيار مناسب. تمر خطوط القوى المغناطيسية خلال الجسم ، المراد فحصه، عند وضعه بين طرفي الفتحة (الذراعين) أثناء مرور التيار في الملف وبهذا يمكن لخطوط المجال ان تكمل الدوره والشكل (1-18) يوضح ذلك.

## تيارات الممغنطة:

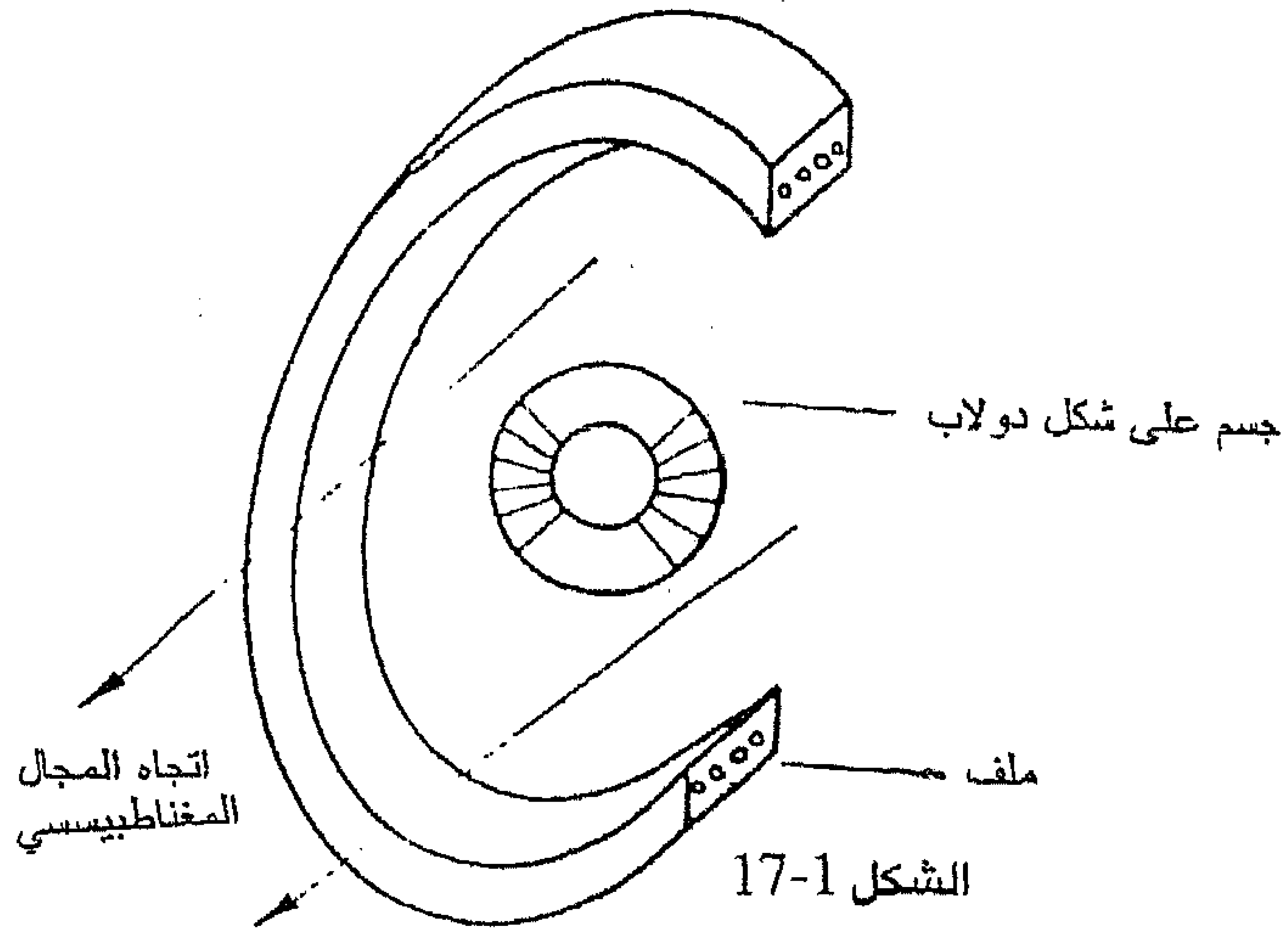
يمكن استخدام التيار المباشر (Direct Current) سواءً المأخوذ من البطاريات او الأجهزة المعدّلة للتيار المتناوب (Rectifiers). ومن خواص التيار المباشر أنه يمر بعمق أكبر في الجزء المفحوص.

أما النوع الآخر فهو التيار المعدَّل (المقوَّم) نصف موجياً (half-wave rectified current) وهو التيار الأكثر تأثيراً عند التفتيش عن الشقوق او العيوب السطحية (Surface defects) وتحت السطحية(Subsurface defects) والنبضات الموجودة في هذا النوع من التيار تساعد على زيادة قابلية حركة الدقائق المغناطيسية والتجمع على العيوب ومن ثم اظهارها بصوره واضحة.

والنوع الثالث هو التيار المتناوب (Alternating Current) "A C" اي الذي له تردد معين وهو التيار الأكثر فعالية لفحص الشقوق السطحية وخصوصاً الشقوق الناتجة عن الكلال (fatigue). يستفاد من استخدام هذا النوع من التيار في ازالة آثار التمغنط المتخلفة بعد الفحص أيضاً.

## اتجاه المجال المغناطيسي:

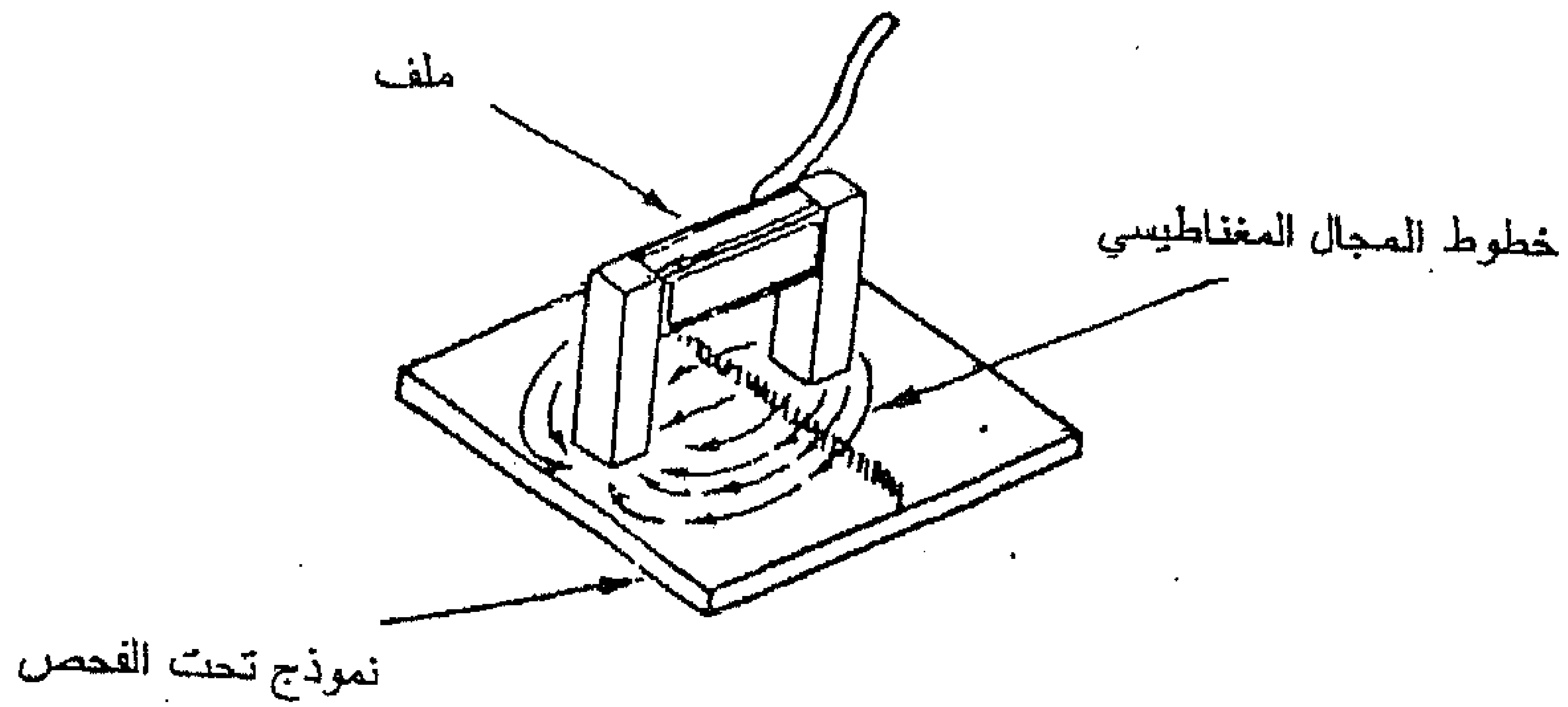
يؤثر اتجاه المجال المغناطيسي بالنسبة للشق او العيب على فاعلية هذه الطريقة




الشكل 1-17

دول بـ موضوع في فتحة ملف يمر به التيار.

العيوب القطرية (باتجاه القطر) تظهر فقط في المنطقة المظللة وقد لا تظهر في المناطق الأخرى




الشكل 1-18

تمغنط طولي بواسطة اليوك(المقرن)

في الفحص أكثر من نوعية التيار المستخدم.ويجب ان تكون خطوط القوى المغناطيسية عمودية على الشق المراد إظهاره بشكل واضح.يتكون تسرب مغناطيسي قليل جداً عند الشق إذا كانت خطوط القوى موازية للشق وعليه سيكون انجذاب الدقائق اليه قليل أيضاً، إن لم يكن معدوماً ،ولهذا لايمكن إظهار العيوب بصورة جليه.

**طريقة العمل:**

يكون المجال المغناطيسي على أشده عندما يكون التيار في حالة مرور. أما بعد انقطاع التيار فإن المجال المغناطيسي سينخفض الى أدنى مستواً له ويسمى المجال المغناطيسي المتخلف.يكون المجال المغناطيسي المتخلف ضعيف جداً في الفولاذ المطيل (mild Steel)ولذا يكون انجذاب الدقائق المغناطيسية ضعيفاً أيضاً ومن ثم يكون الاستدلال على وجود العيب كذلك. أما في حالة الفولاذ الصلد (المحتوى على نسبه عالية من الكاربون) فيكون المجال المتخلف عالياً نسبياً إلا أنه يظل أقل مما لو كان التيار في حالة مرور. لذلك يمكن القول بأن الفحص أثناء مرور التيار الكهربائي المغنط أدق وأضمن وعندها تسمى هذه الطريقة بطريقة المجال المستمر كما يسمى الفحص بعد انقطاع التيار بطريقة المجال المتخلف. يصعب استخدام الطريقة الاخيرة في فحص العيوب التي تحت السطح، لذلك يمكن استغلال هذه الخاصية للتفريق بين العيوب السطحية وتحت السطحية، وذلك بتعريض الجسم المراد فحصه للدقائق المغناطيسية مرتين، مرةً أثناء مرور التيار المغنط مع تسليط تيار هوائي خفيف لإزالة الفائض من الدقائق ومن ثم تحديد أماكن تجمعها التي تدل على وجود العيوب. وتعاد العمليه مره ثانية بعد قطع التيار الكهربائي المغنط (طريقة المجال المتخلف) وعندها سيكون التجمع على العيوب السطحية فقط.

تسمى طريقة تعريض الجسم للدقائق بتذريتها في الهواء بالطريقة الجافة نظراً لكون كلا من الدقائق والجسم المراد فحصه جافين تماماً.

يغمر الجزء المراد فحصه في سائل رائق (كالماء او الزيت او ماشابه ذلك) يحتوي على دقائق مغناطيسية عالقة فيه (لتكون قابليتها على الحركة كبيرة) وتدعى

بالطريقة الرطبه،ويمكن تسليط السائل على الجزء المراد فحصه بواسطة صنبور (حنفية) أو أية وسيلة أخرى. تنجذب الدقائق العالقة نحو العيوب السطحية عند مرور التيار الكهربائي. ويستحسن، في حالة غمر الجزء في السائل ، عدم وجود تيارات حركية لكي لاتعمل على ازالة تجمعات الدقائق المجذوبة جذباً خفيفاً بسبب ضعف المجال المغناطيسي المتسرب.

**ملاحظات حول هذه التقنية:**

أ- لا تكون الدقائق المستخدمة في العادة ، مجرد برادة حديد بل هي دقائق منتقاة خصيصاً من بعض اكاسيد الحديد ولها حجم وشكل وقابلية معينة على التمغنط والاحتفاظ بالمغنطة لتلائم مثل هذه الفحوص . تلون هذه الدقائق غالباً، ليسهل تمييزها على اختلاف الوان الاجزاء المفحوصة.

ب- يتم تجهيز الدقائق في الطريقة الرطبة بشكل معجون مغناطيسي (وهو متوفر بأكثر من لون). يتم حل المعجون في سائل خفيف وشفاف وبذلك يكون المحلول جاهزاً للفحص الى ان يتلوث بصورة تعيق عملية الفحص فعند ذلك يجب استبداله.

جـ- يتم طلاء بعض انواع الدقائق بمادة متألقة (fluorescent) وخصوصاً تحت الأشعة فوق البنفسجية ، لزيادة مدى إظهارها ومن ثم رؤيتها بوضوح سيما التجمعات القليلة على الشقوق الدقيقة. ويجب إزالة اي مادة متألقة أخرى عن الجسم المراد فحصه قبل بدء الفحص لما تسببه من تشويش وخلط بين تراكمات الدقائق والمادة المتألقة الموجودة مسبقاً، كما يستحسن، زيادة في الدقة، أجراء هذا الفحص في مكانٍ مظلم تقريباً لمنع تأثير الضوء المرئي مهما أمكن .يكون مصباح بخار الزئبق هو مصدر الأشعة القريبة من فوق البنفسجية (وتسمى احياناً بالضوء الأسود وهي ذات طول موجي مقداره 365 نانوميتر وهي غير خطره على العين او الجلد). يزوّد مصباح بخار الزئبق بمرشح خاص للحصول على هذا الطول الموجي.

د- يستحسن ، وقد يكون ضرورياً في بعض الأحيان، إزالة التمغنط المتخلف في الجزء بعد الفحص للأسباب التالية:

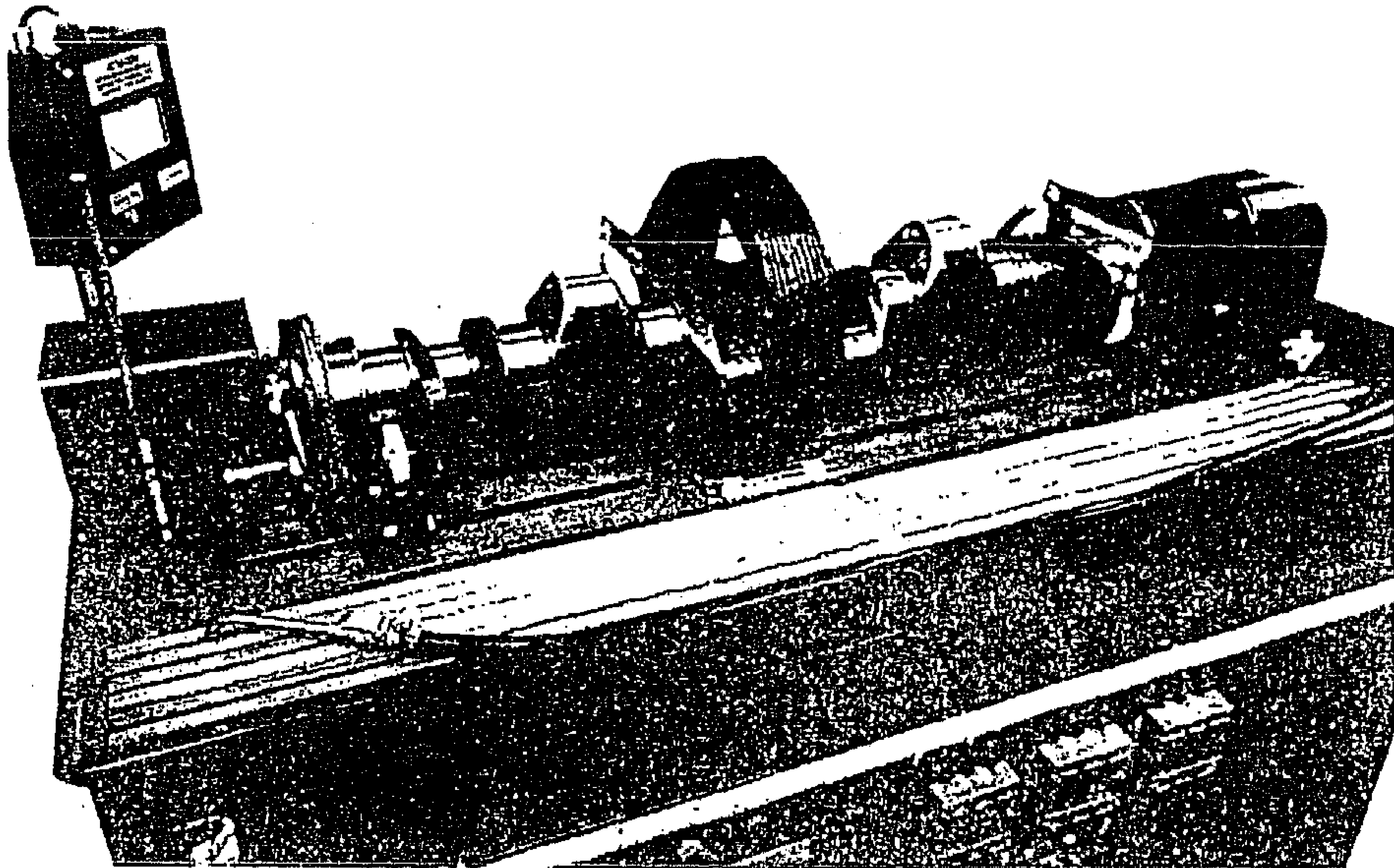
١- تقليل الاحتكاك الناتج عن المغناطيسية المتخلفة في الأجزاء المتحركة وخصوصاً إذا كان التمغنط المتخلف قوياً كما هو الحال بين المكبس وجدار اسطوانته (Pis-ton and cylinder).

٢- التأثيرات السلبية الناتجة عنه على أجهزة القيادة والسيطرة وخصوصاً في الطائرات حيث يؤثر هذا المجال، على سبيل المثال، على البوصلات وأجهزة قياس التيار والفولتيه وغيرها.

٣- التأثيرعلى نظافة الجزء حيث تجمع المغناطيسية المتخلفة دقائق و رقائق المواد المغناطيسية لتلتصق على سطح الجزء المفحوص، إضافة الى تأثير هذه الظاهرة على نوعية اللحام عند لحام الجزء حيث تلتحم المواد العالقة عند منطقة اللحام لتشوه السطح، اضافة الى احتمال انحراف القوس الكهربائي اثناء اللحام اذا كان التمغنط المتخلف شديداً.

تتم ازالة التمغنط المتخلف بوضع الجسم في مجال مغناطيسي متغير الإتجاه (في ملف او بين فتحة مقرن يمر فيه تيار متناوب) مع تغيير قيمته تدريجياً ومن ثم يسحب الجسم بهدوء. أما الطريقة الأخرى فهي رفع درجة حرارة الجسم الى الدرجة التي تزال عندها الخواص المغناطيسية (درجة حرارة كوري) والتي هي بحدود 650-870 درجة مئوية وحسب طبيعة ومادة الجسم، لكنه لايخفى مالهذه الطريقة من جوانب سلبية على المعاملات الحرارية السابقة للجسم إضافة الى الأكسدة الناتجة عن ذلك ، وهناك طريقة ثالثة لإزالة المغناطيسية المتخلفة وهي الطرق الميكانيكي للجزء لكن لهذه الطريقة جوانب سلبية هي احتمالية تشقق او تشوه الجزء، وبهذا تكون الطريقة الأولى هي الأنسب.

هناك تطبيقات عديده لهذه التقنية في الصناعة ويشاهد في الشكل (1-19) احدى هذه التطبيقات وهي فحص العمود المرفقي (Crankshaft) لسياره.



الشكل 1-19

منصة لفحص الأعمدة المرفقية بالدقائق المغناطيسية

## ٤-٤-١ الفحص بالطريقة الشعاعية:

**المقدمة:**

ان الغايه من الفحص بالطريقة الشعاعية هو الحصول على صورٍ دقيقة وواضحة للعيوب الموجودة في الجسم (الجزء المراد فحصه). تتكون هذه الصور نتيجة لتغير شدة الأشعة بسبب مرورها خلال الجسم. ويعزى هذا الإختلاف لمدى شفافية الأجسام للأشعة السينية أو أشعة كاما او النيوترونات. يتم تسجيل هذه الاختلافات عادة على فلم تصوير (Photographic film) بدلالة الاختلافات في درجة الإسوداد الناتج في الفلم . يمكن اختبار حساسية الطريقة باستخدام ما يسمى بكاشف نوعية الصورة ( Image Quality Indicator "IQI) حيث يتم وضعه على الجسم من جهة سقوط الاشعة بحيث يكون تصويره مع الجسم في آن واحد.

يوخذ مقدار وضوح كاشف نوعية الصوره المرئي على الفلم المحمض كدليل لنوعية او حساسية هذه التقنية بشكل عام ومن ثم لنوعية العيوب الموجودة في لصورة.

يمكن تقسيم هذا الأسلوب من الفحص الى أكثر من تقنية وأهمها:

١- الفحص بالأشعة الكهرومغناطيسية قصيرة الطول الموجي ، وتنقسم بدورها الى تقنيتين:

أ- الفحص بالأشعة السينية X-Ray Radiography

ب- الفحص بأشعة كاما ɣ - Ray Radiography

٢- الفحص شعاعياً بالنيوترونات Neutron Radiography

**الفحص بالأشعة السينية وأشعة كاما:**

قبل الدخول في تفاصيل وأسس الفحص بهذه الطريقة من المفضل اعطاء فكره عن طبيعة هذه الاشعاعات.

ان طبيعة كلتا الاشعتين واحده وهما جزء من طيف الأشعة الكهرومغناطيسية.

يشتمل هذا الطيف إضافة الى أشعة كاما والأشعة السينية على الأشعة فوق البنفسجية والضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء وغير ذلك من الأشعة كأشعة الرادار والراديو الى آخره، كما في شكل (1-20) .

يختلف كل من أشعة كاما والأشعة السينية عن بقية أمواج الطيف في ان لهما أطوال موجيه قصيرة.

يقع الطول الموجي للأشعة السينية وأشعة كاما المستخدمين في الفحص الشعاعي بين (1) انكستروم (Å) الى أجزاء من الألف من الإنكستروم ($1Å= 10^{-8}$ cm) . يحدد الطول الموجي قدرة الاشعة على اختراق المادة حيث أن

$$E = h\upsilon = h\frac{c}{\lambda} \quad \text{.......................} \quad (1\text{-}1)$$

E : طاقة الفوتون .

$\upsilon$ : التردد بالهيرتز (Hz)

h : ثابت بلانك

C: سرعة الضوء ($3x10^{10}$ cm/sec)

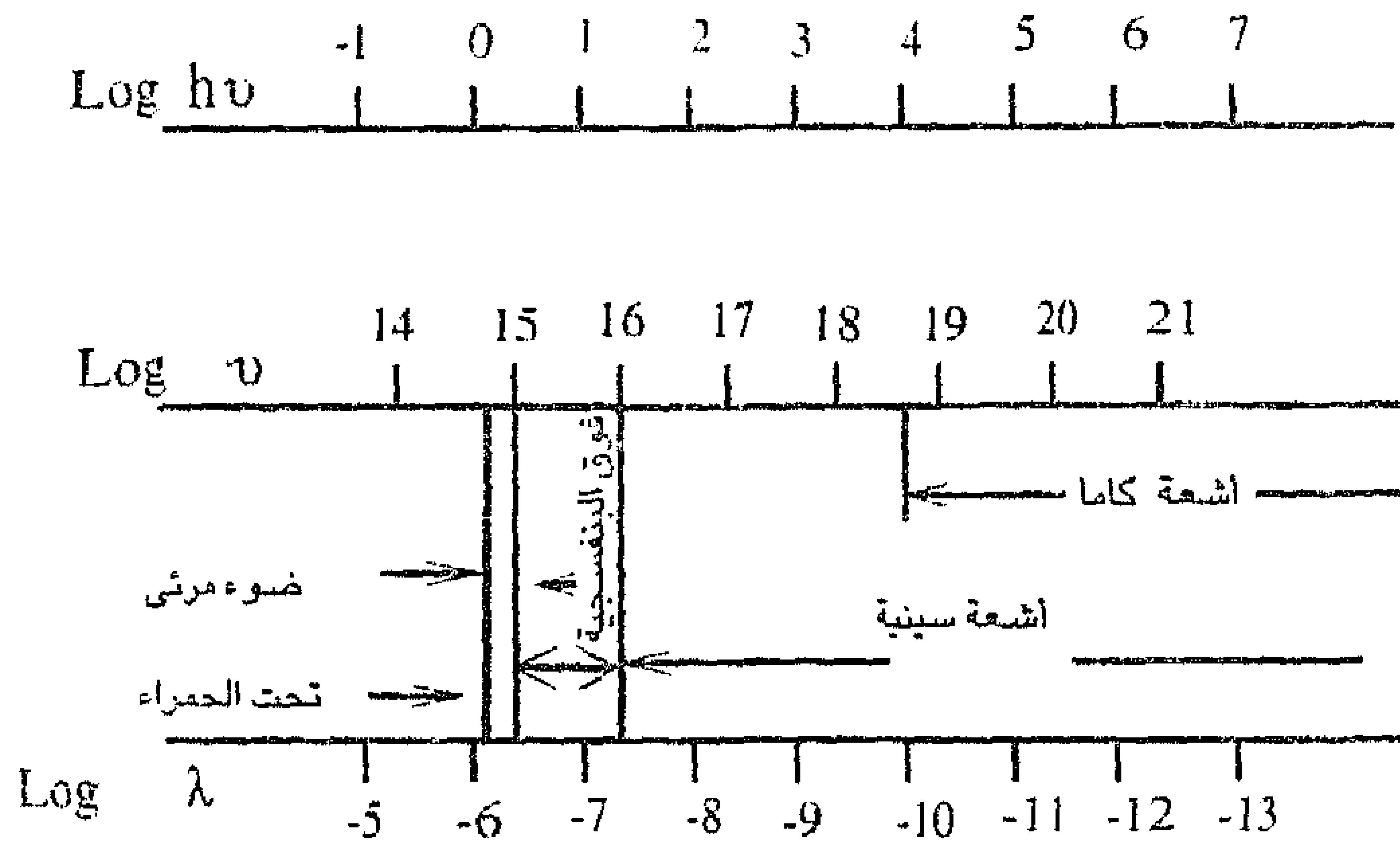
$\lambda$– الطول الموجي

يتبين من هذه المعادلة أنه كلما كان الطول الموجي للأشعة أقصر كلما كانت طاقة الفوتون أكبر ومن ثم قدرة أختراق أعلى.

يكمن الفرق الأساس بين الأشعة السينية وأشعة كاما. كما سيتبين فيما بعد، في اختلاف مصدرهما وفي توزيع الطول الموجي في طيف كلٍ منهما.

**الأشعة السينية:**

تتولد الأشعة السينية من التباطء المفاجيء للإلكترونات المعجلة بوساطة فرق جهد كهربائي عالي، عند اصطدامها بلوح معدني ملائم . تتم السيطرة على الطاقة الحركية للإلكترونات المعجلة ومن ثم الطول الموجي للأشعة بوساطة فرق الجهد (الفولتية) بين المصعد (anode)والمهبط (cathode). لذا يمكن تغيير الطول الموجي عند الحاجة بتغيير الفولتيه المعجلة.




hυ = طاقة الفوتون (ev) ، υ = التردد (Hz) ، λ = الطول الموجي (m)

**الشكل 1-20**

**جزء من طيف الأشعة الكهرومغناطيسية مع طاقة فوتوناتها (ev)**

يمكن التعبير عن اقصر طول موجي ($\lambda$ min) موجود في حزمة الأشعة السينية عند فولتيه معجلة مقدارها (V) بالفولت بالآتي:

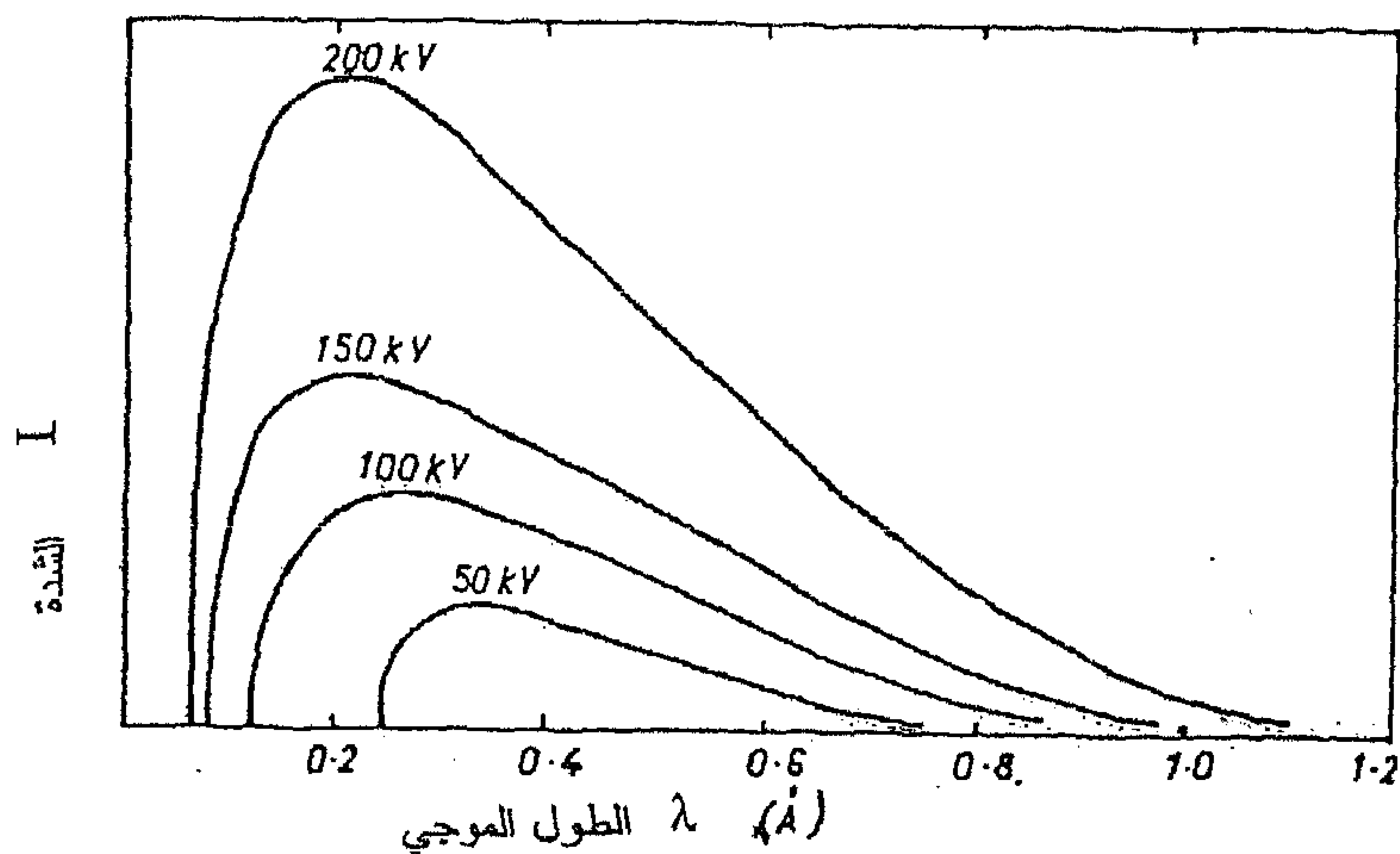
$$\lambda \text{ min} = h \quad \frac{12400}{V} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(2\text{-}1)$$

يتألف طيف الأشعة السينية الناتج من أشعاعات ذات اطوال موجية مختلفة . ينزاح الطول الموجي عند أعظم شدة نحو الجهة الأقصر للطول الموجي كلما زادت الفولتيه المعجلة المستخدمة . كما في شكل (1-21) . ولهذا تزداد قدرة الأشعة السينية على اختراق الأجسام كلما زادت الفولتيه المعجلة كما في الشكل (1-22).

تكون أعظم شدة عند طول موجي أطول بقليل من الطول الموجي الأقصر($\lambda$ min).

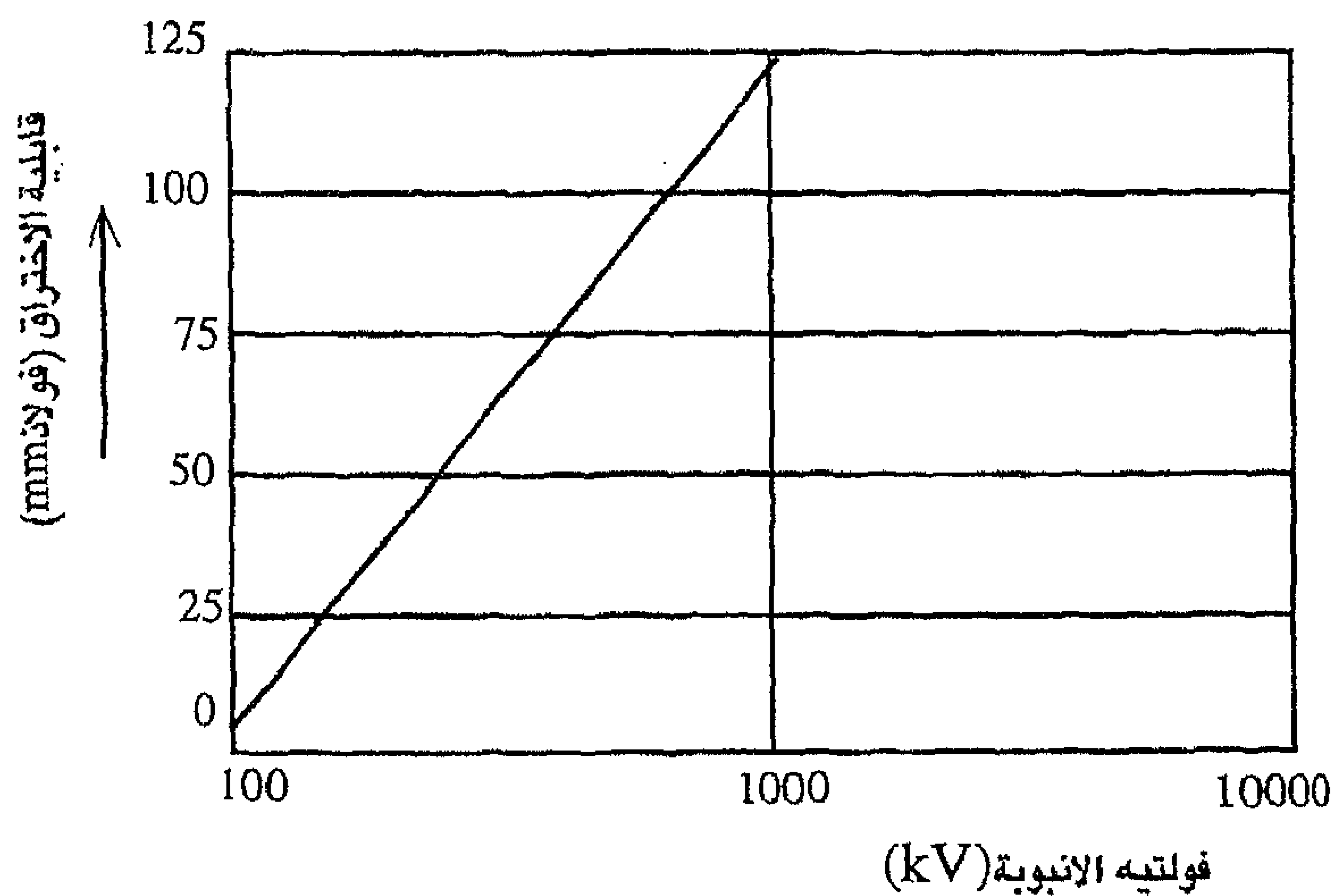
ان المنحنيات الموجودة في شكل (1-21) صحيحة على وجه التقريب حيث لم تؤخذ في الاعتبار الاشعاعات المنفصلة عن بعضها والمميزة (characteristic radiation)

لكل عنصر تتألف منه سبيكة الهدف (target) . وسيتم التطرق الى تفاصيل ذلك عند دراستنا لحيود الأشعة السينية .




الشكل 1-21

توزيع الأطوال الموجية مع الشدات النسبية كدالة للفولتيه المعجلة




شكل 1-22

تأثير الفولتيه المعجلة على قابلية اختراق الأشعة السينية.

أما أشعة كاما فتتألف من إشعاعات تنبعث تلقائياً من قبل مواد معينة والتي يمكن ان نكون مواد طبيعية (على سبيل المثال الراديوم والرادون والثوريوم) او صناعية (مواد نشطة شعاعياً).

تمتلك أشعة كاما المنبعثه من النظائر المشعة (radioactive isotopes) واحد أو أكثر من الأطوال الموجية والتي تكون مميزة لكل نظير مشع ، أي أن لكل نظير مشع طيفه المميز.

إذا تأملنا حزمة من الأشعة منبعثة أما من مصدر للأشعة السينية او أشعة كاما ، فسنرى أنها تتصف بأطول موجية هي التي تتألف منها الحزمة وبشدة معينه أي بكمية معينة من الطاقة تمر بالثانية الواحدة خلال سنتمتر مربع واحد على سطح عمودي على الحزمة نفسها.

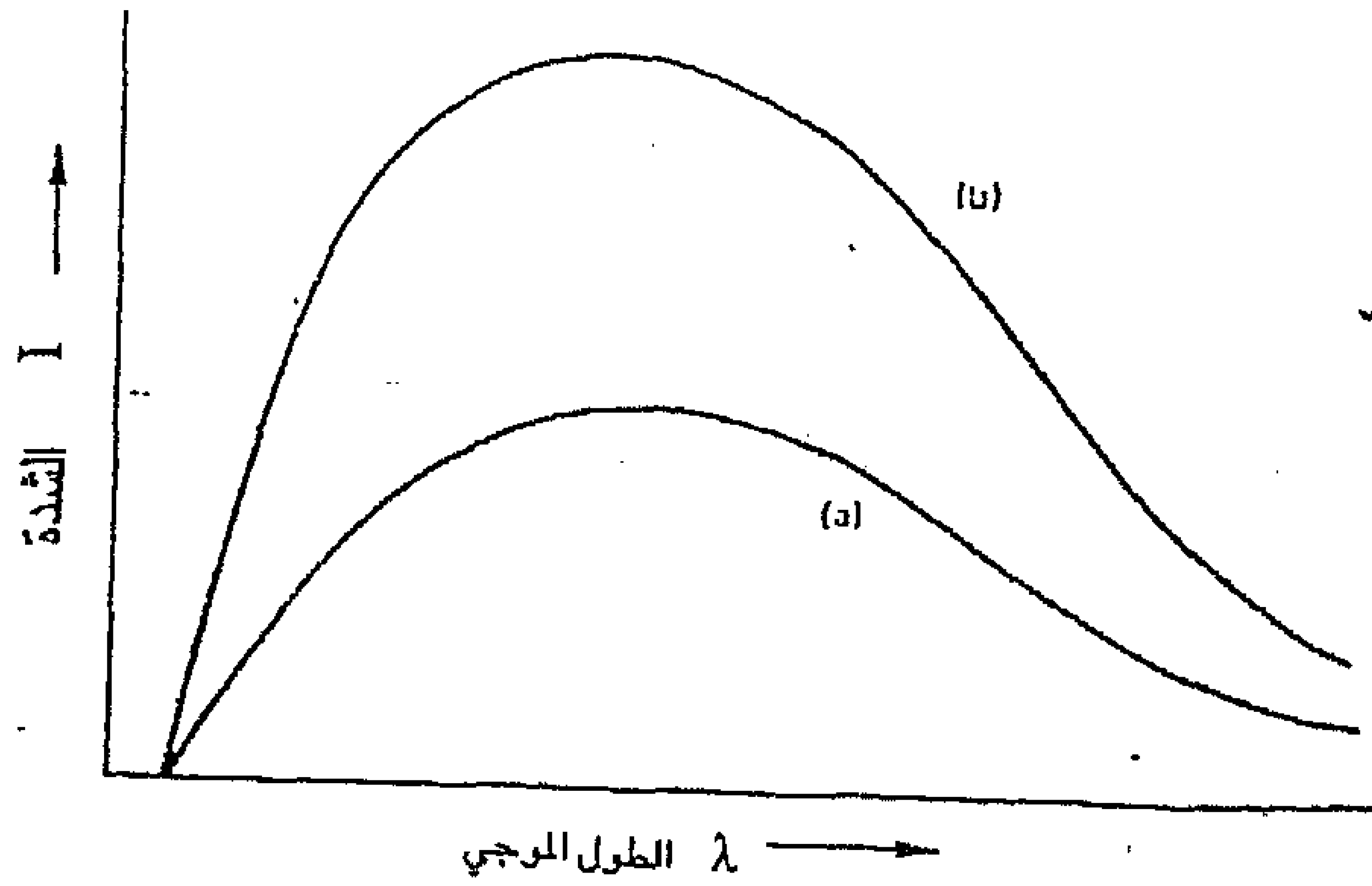
تقاس شدة الأشعة السينية او كاما من الناحية العملية بالرونتكن R (roentgen)* بالثانية . يمكن تغيير شدة الأشعة السينية، والى مدى معين، بتغيير التيار المار بأنبوبة الأشعة السينية عند فولتيه تعجيل محدده كما في شكل 1-23 .

أما في حالة أشعة كاما، فتكون الشدة المنبعثة من المصدر احدى خواص المصدر نفسه وعليه لايمكن التلاعب بها.

تعتمد شدة الأشعة الواصلة الى فلم التصوير على المسافة بين المصدر والفلم (Sfd) حتى لو لم يكن هناك نموذج للفحص وحسب قانون التربيع العكسي، اي انه إذا تضاعفت المسافة مرتين فالشدة ستنخفض الى الربع وعليه تلزم زيادة زمن التعريض اربع مرات، على سبيل المثال:

---

* الرونتكن: هو مقدار الاشعة السينية او أشعة كاما التي إذا مرت خلال سنتمتر مكعب من الهواء الجاف عند درجة الصفر المئوي وضغط جوي واحد تحرر بالتأين مقداراً من الكهربائية يساوي وحده واحدة من الكهربائية المستقرة.



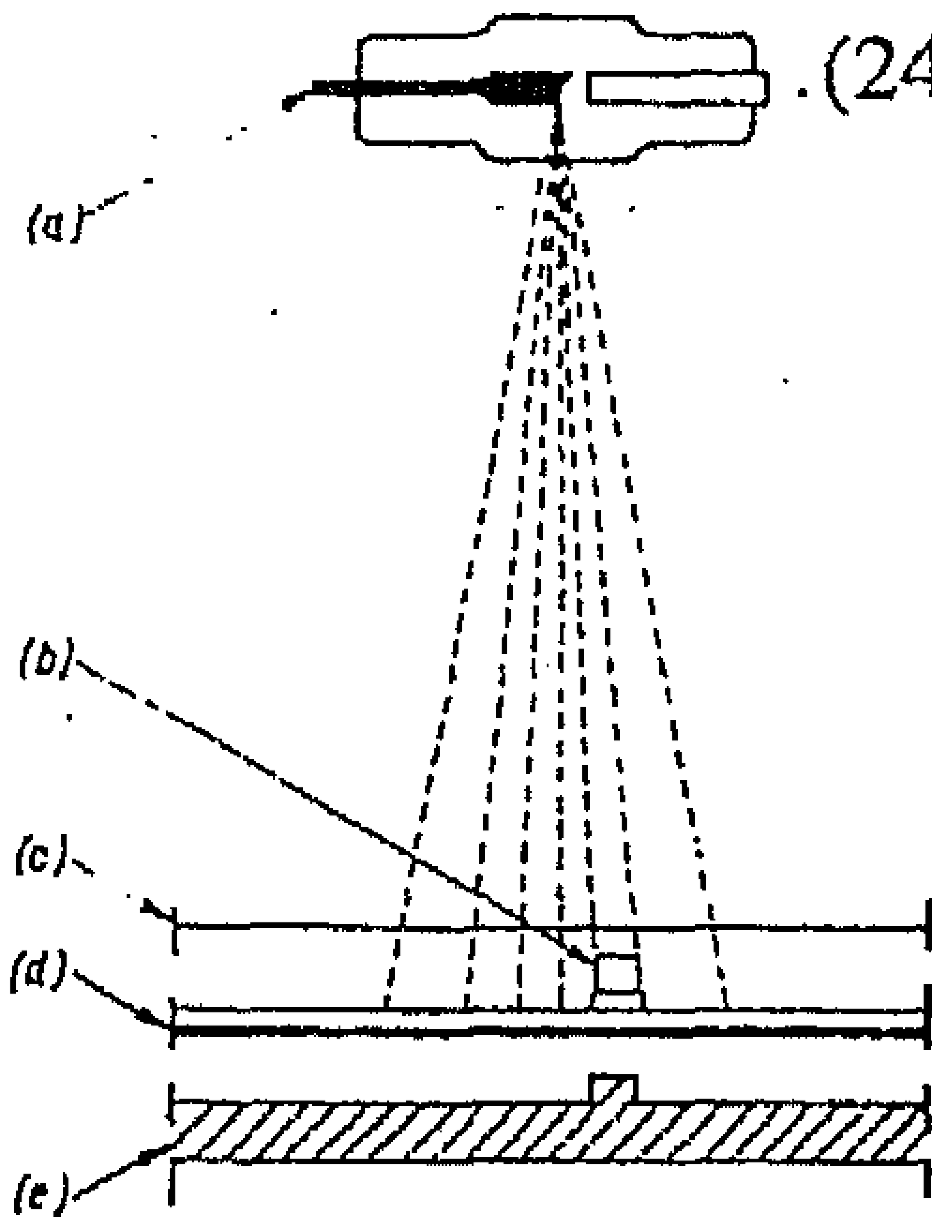

شكل 1-23
تاثير تيار الانبوبة على تغير شدة الأشعة السينية مع الطول الموجي
a- تيار انبوبه منخفض
b- تيار انبوبة عالي

تمتلك أشعة كاما والأشعة السينية القابلية على اختراق الأجسام حتى المعتمة بالنسبة للضوء المرئى . ويجب ملاحظة ان شدة الشعاع النافذ من الجسم هي اقل من شدة الشعاع الساقط عليه. يعتمد مقدار التوهين في شدة الشعاع النافذ على طبيعة وسمك النموذج وحسب العلاقة التالية:

$$I= I_0\, e^{-\mu t} \text{ ........... } (3\text{-}1)$$

حيث تمثل Io شدة الشعاع الساقط، و I شدة الشعاع النافذ بعد مروره خلال النموذج، و μ معامل الإمتصاص والذي يعتمد بدوره على العدد الذري وكثافة مادة النموذج وعلى طاقة الاشعة (طولها الموجي) ، و t السمك المار خلاله الشعاع و e هي أساس اللوغا ريتم الطبيعي ( 2.718).

تحتل المعادلة (1-3) أهمية عملية خاصة ، حيث تعتبر الأساس لكل طرائق الفحص الشعاعية ويمكن ملاحظة ذلك من الشكل (1-24).




شمل 1-24 رسم تخطيطي لتكوين الصوره الشعاعيه
a – انبوبة الأشعة السينية
b– فجوة c–لوح فولاذي
d– فلم تصوير
e – توزيع شدة الإسوداد على فلم التصوير

فعندما توجه حزمة من أشعة منتظمة الشدة على لوح حديدي له سمك ثابت فشدة الحزمه النافذة تكون أقل من شدة الحزمة الساقطة لكنها تبقى منتظمة خلال الحزمة النافذة أيضاً. ولو فرضنا ان هناك فجوة هوائية موجودة في اللوح، فستعاني الأشعة التي تمر خلال المنطقة التي فيها الفجوة توهيناً أقل مما تعانيه الأشعة المارة الى بقية أجزاء اللوح الخالية من الفجوات، لأن الهواء الموجود في الفجوة له عدد ذري وكثافة أقل بكثير مما للمادة الحديدية لذلك يكون امتصاص الأشعة قليلاً في منطقة الفجوة. اي تكون شدة الأشعة النافذة من منطقة الفجوة اكثر من شدة الأشعة النافذة من المناطق الاخرى.

ولو فرضنا ان الفجوة آنفة الذكر ملأت بالرصاص (وهو مادة لها عدد ذري وكثافة اعلى من الحديد ومن ثم لها معامل توهين (μ) أكبر).، فسنلاحظ ظاهرة معاكسة، أي تكون شدة الأشعة الماره خلال الفجوة المملوءة بالرصاص أقل من سواها.

تمتلك الأشعة السينية وأشعة كاما الخواص التالية:

أ- تؤين المادة، مكونةً أيونات موجبة وسالبة، لذلك تعرف هذه الأشعة بالأشعة المؤينه، أن مقدار التأين هو دلالة على شدة الأشعة وعليه يمكن استخدامه كمعيارٍ لقياس كمية الإشعاع.

ب- تخترق المادة والى مدى يعتمد على كثافة المادة وسمكها وكتلتها الذرية النسبية وأخيراً الطول الموجي للأشعة. تمتلك أشعة كاما أطوال موجية أقصر بصوره عامة من تلك التي تمتلكها الأشعة السينية، وعليه تكون قدرة أشعة كاما على الاختراق أكبر.

جـ- تنتقل بخطوط مستقيمة وبسرعة الضوء.

د- يتم تشتيتها جزئياً من قبل المادة التي تمر فيها، يكون تأثير التشتت أكبر للمادة الأكثر سمكاً.

هـ- تسبب تأثيراً كيماوياً ضوئياً (photo-chemical effect)في المستحلبات الفوتوغرافية ويستفاد من هذه الخاصية لتكوين صور شعاعية لدراسة العيوب الداخلية في الاجزاء.

و- تولد تألقاً في بعض المواد. ويستفاد من هذه الصفة عند استخدامها في شاشة عرض منظار التألق لفحص المواد.

ز- تسبب تأثيراتٍ حيويةٍ مضره؛ وعليه فإن التعرض لها لمدةٍ تفوق المدة الموصى بها مضر لجسم الإنسان الذي تعوزه الحاسة القابله على تحسسها، لذلك يلزم اتخاذ احتياطات الزامية للوقاية من هذه الإشعاعات.

**عملية التصوير الشعاعي:**

يتم إظهار التغيرات في شدة الأشعة النافذة باستخدام الخواص الأساسية آنفة الذكر للأشعتين كاما والسينية ، حيث تؤثر على المستحلب الضوئي (الفوتوغرافي) أما مباشرة او بتوليد ضوء عن طريق التألق. فتتحول التغييرات في شدة الشعاع النافذ الى اختلافات في مقدار الاسوداد على فلم التصوير.

تتضمن الصوره الشعاعية اذن مساقط لمختلف أجزاء الجسم المفحوص، حيث يفهم مما ذكر سابقاً أن بالإمكان تحديد التغييرات في سمك الجسم وطبيعة الاجزاء التي تخترقها الأشعة.

**العوامل الهندسية المؤثرة على نوعية الصورة:**

يشير الشكل (1-25) الى أن صورة العيب لاتكون حادة المعالم عادةً حيث تحيط بها منطقة شبه الظل. يعود السبب في تكوين هذه المنطقة الى ان مصدر الأشعة ليس نقطياً (Point source) وانما له مساحة معينة بحيث ان صورة اية نقطة في النموذج المفحوص تتوسع ومن ثم تفقد التحديد أو التباين الجيد عند الحواف.

ومن تشابه المثلثين 1 و 2 نستنتج الآتي:

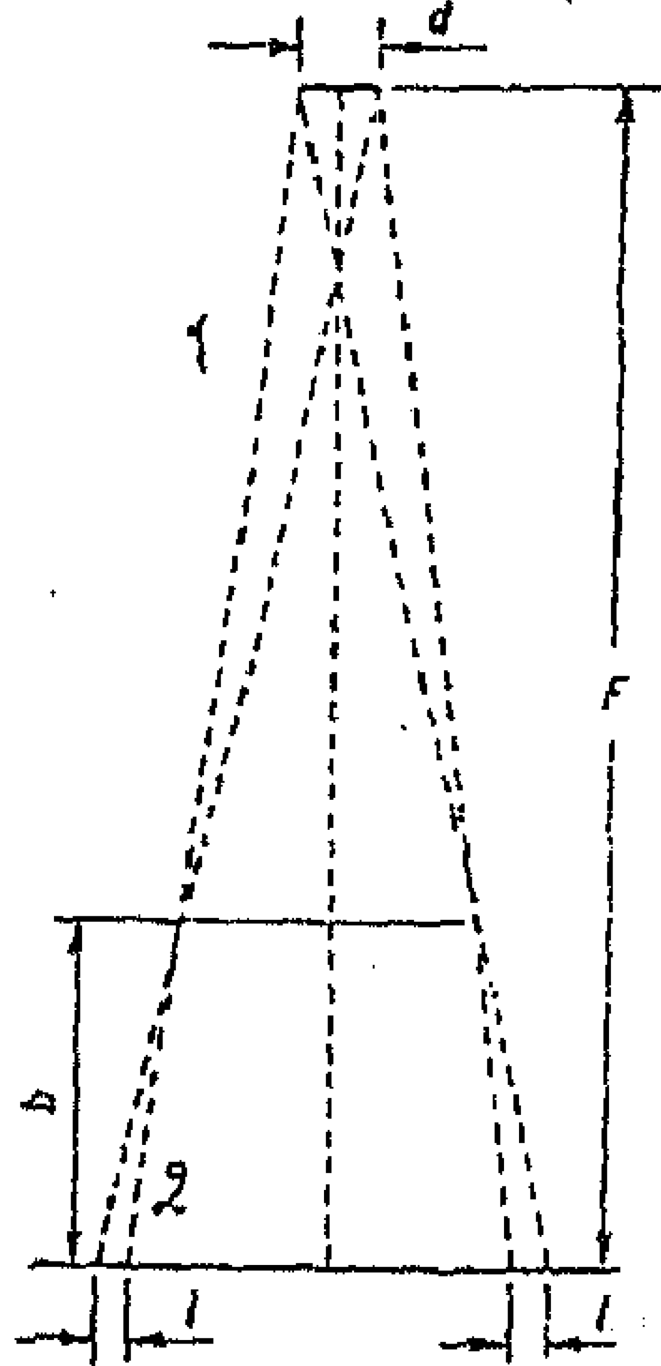
$$\frac{l}{d} = \frac{b}{F-b} \text{ ...............(4-1)}$$

l: مقدار منطقة شبه الظل

d: قطر مصدر الإشعاع و b المسافة بين العيب وفلم التصوير

F–b: هي المسافة بين مصدر الإشعاع والجسم.

ومن المعادلة يمكن حساب مقدار منطقة شبه الظل إذا علمت العوامل الأخرى. ولتقليل منطقة شبه الظل يجب استخدام مصدر صغير القطر او نقطي اذا أمكن ذلك او زيادة المسافة بين مصدر الإشعاع والجسم وأخيراً تقليل المسافة بين الفلم و الجسم (أي جعل الفلم ملاصقاً للجسم المراد فحصه جهد الإمكان).



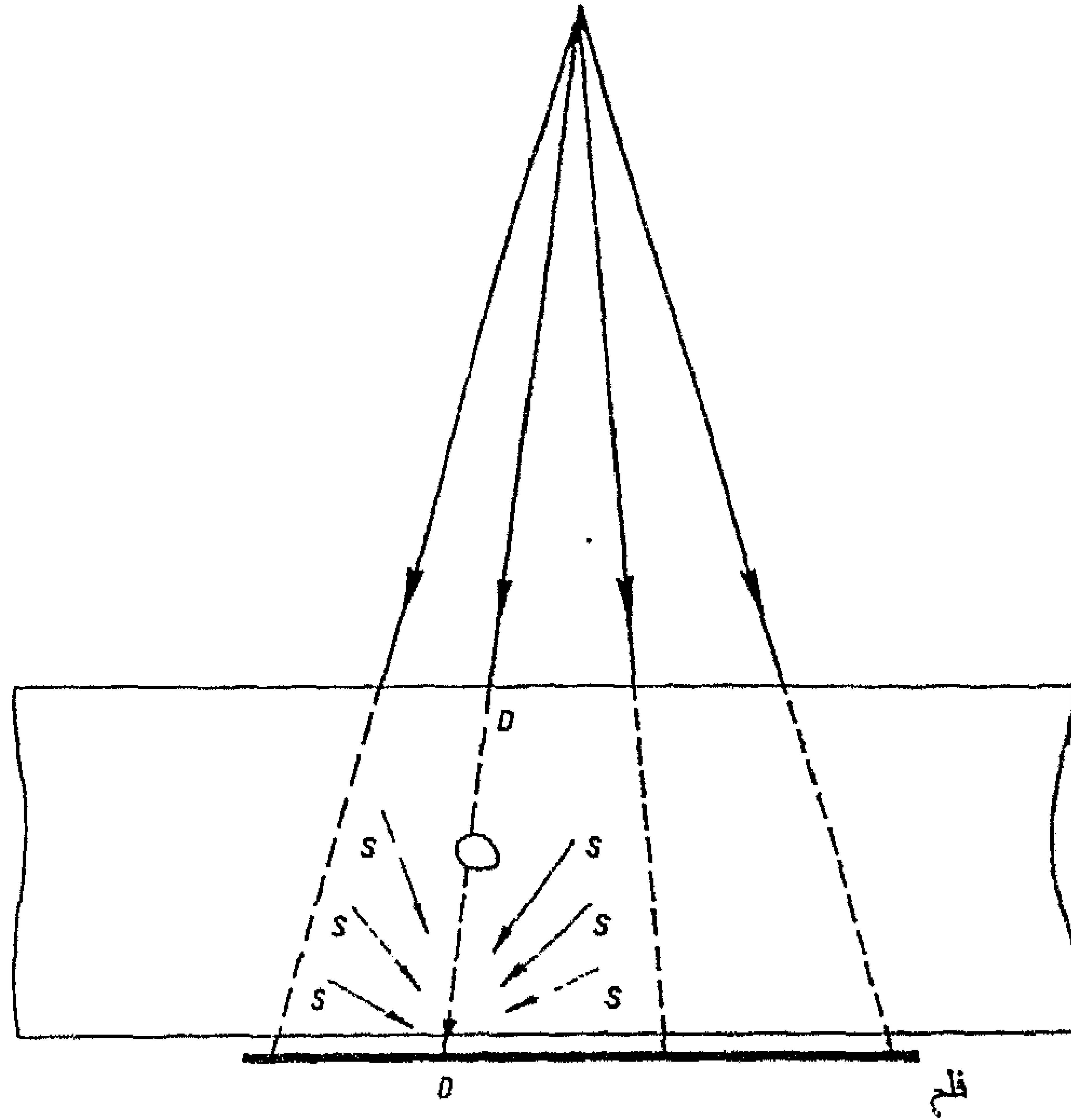

ظاهرة شبه الظل

شكل 1-25

صورة العيب أو حافة الجسم لا تكون حادة المعالم (تحتوي على شبه الظل)

**تشتيت الأشعة:**

تقل حساسية الفحص الشعاعي بشكل كبير بسبب الأشعة المتشتتة، حيث لاتشترك هذه الأشعة في تكوين صورة العيب كما يظهر من الشكل (1-26). لايمكن التخلص من الأشعة المتشتتة إلا أنه يجب تخفيفها الى أدنى حد ممكن وذلك بتحديد مجال الأشعة السينية الى أدنى حيز (مساحة) مطلوب باستخدام فتحة مناسبة وذلك لتجنب الأشعة المتشتتة غير المرغوب فيها والّتي تتولد خارج المساحة المراد فحصها. كما يجب حماية الفلم من الأشعة المتشتته من الخلف اي من الجدران والأرضية بوساطة حفظه في علبه محاطة بلوح رصاصي سمكه 2 ملم.




**تأثير الأشعة المتشتتة على صورة العيب .**

**D: أشعة مباشرة S: أشعة مشتتة**

**شكل 1-26**

**مصادر الأشعة:**

تتألف الأجهزة الأساسية للأشعة السينية المستخدمة في الفحص الشعاعي صناعياً من الأجزاء التالية وهي انبوبة الأشعة السينية ومولد الفولتيه المعجلة والدوائر الكهربائية الرابطة ومنظومة التبريد ثم لوحة السيطرة .

أ- انبوبة الأشعة:

تكون انبوبة الأشعة بشكلٍ أساسي من الزجاج المفرغ وفي داخلها المهبط (Cathode) والمربوط بالشعيره(Filament) أيضاً والمصعد (Anode) حي يكون مربوطاً كهربائياً بالهدف المعدني (Metallic Target) ، الشكل (1-27) .

ب- الشعيرة:

وتتألف من سلك معدني (عادةً من التنكستن) ملفوف بشكلٍ مناسب حيث يبعث الإلكترونات إذا تم تسخينه الى درجةٍ كافية . تعتمد كمية الالكترونات المنبعثة على درجة الحرارة التي تصل اليها الشعيرة ولذا يمكن التحكم بها بسهولة، اي بتغيير التيار (ملي امبير) المار بالدائرة الكهربائية للشعيرة، يعتبر مقدار التيار المار بالأنبوبة بالملي امبير مقياساً لشدة الأشعة السينية المنبعثة من الانبوبة (الشكل 1-23) اي أنها تعتمد على سيل الالكترونات المعجلة.

ترتبط الشعيرة الى القطب السالب لدائرة الفولتيه المعجلة ويمثل القطب السالب المهبط. أما التيار اللازم لتسخين الشعيرة فيؤخذ من محوله متغيرة ذات فولتيه واطئة وتيار عالي نسبياً.

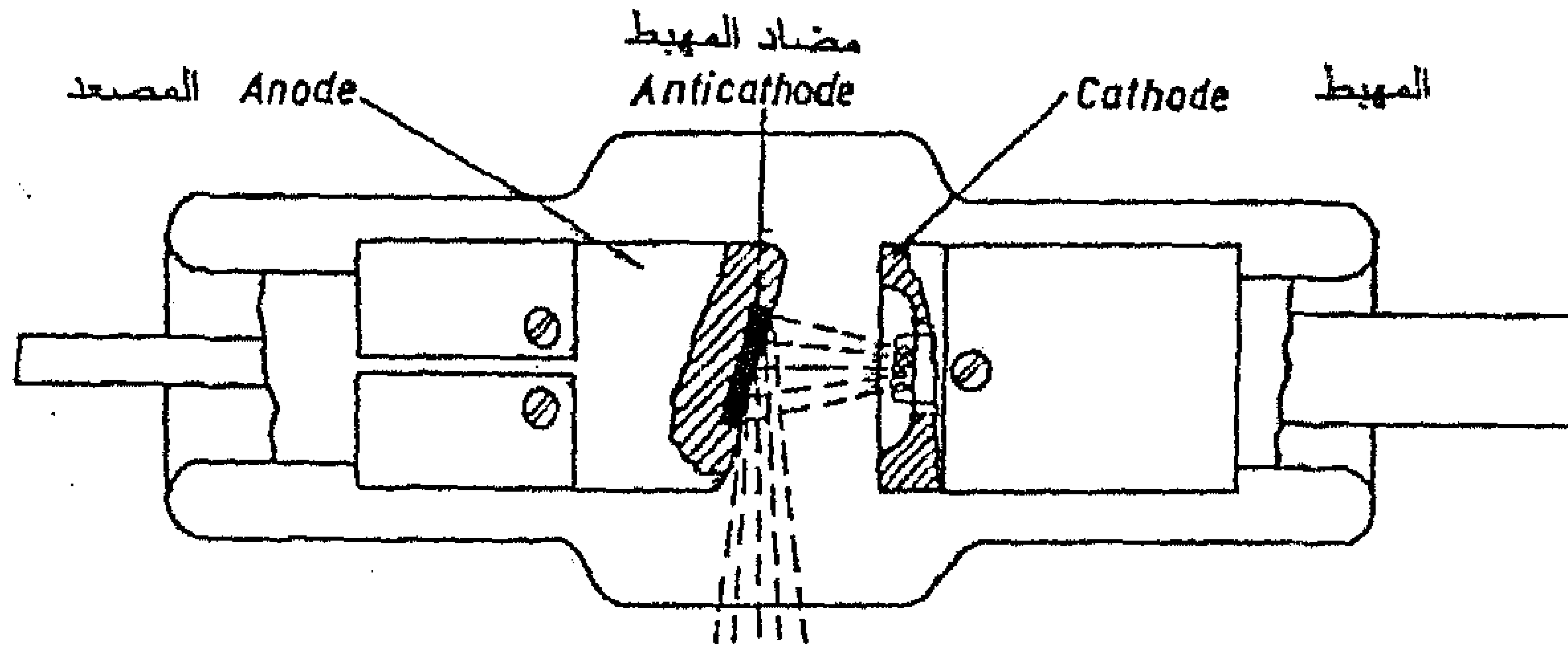
**المصعد:**

ويتألف من قطعة معدنية جيدة التوصيل للحرارة مثل النحاس تحمل قرصاً ذو شكل ملائم من معدنٍ ذي درجة أنصهار عالية، غالباً التنكستن، يسمى الهدف. تتم امالة الهدف بزاوية تتراوح بين $60\text{-}70^{\circ}$ بالنسبة لإتجاه الالكترونات المعجلة الساقطة عليه. يرتبط الهدف الى القطب الموجب لدائرة الفولتيه المعجلة. تستهلك نسبة قليلة (حوالي 1%) من طاقة الإلكترونات المعجلة عند اصطدامها بالهدف لتوليد الأشعة السينية اما الباقي فتتحول الى حرارة ، لذلك يتحتم تبريد الهدف تبريداً كفوءاً ، خصوصاً عند استخدام فولتيات تعجيل عالية، وإلا قد يصل معدن الهدف الى درجة حرارة الإنصهار بعد فترة معينة من اشتغال الجهاز ومن ثم تتلف الأنبوبه.

هناك العديد من نظم التبريد المتبعة وتختلف حسب قدرة أنبوبة الأشعة ومواصفات الجهاز. يسود نوعين أساسيين من أنظمة التبريد هما :

١- **التبريد بالحمل:** وهو التبريد بوساطة تيارات الحمل الهوائية والتي إما أن تكون تيارات طبيعية او بمساعدة مضخة دفع هوائية.

٢- **التبريد بسائل:** ويكون التبريد هنا بسائل تبريد يدفع بوساطة مضخة الى المصعد (الهدف) لتبريده ومن ثم امكانية زيادة التيار المار بالأنبوبه. يكون سائل التبريد إما زيتاً أو ماءً في دائرةٍ مغلقة في الغالب.




الشكل 1-27

رسم تخطيطي لأنبوبة الأشعة السينية ذات الاتجاه الواحد

**أشعة كاما:**

وهي أشعة كهرومغناطيسية أيضاً، كما تم ذكره ، ملائمة للفحص الشعاعي ويتم أشعاعها تلقائياً من المواد او النظائر النشطة اشعاعياً (Radio active Iso-topes) . تنطلق فوتونات (Photons) أشعة كاما أثناء عملية اضمحلال النواة غير المستقرة.

يكون مصدر أشعة كاما اما مادة مشعة طبيعياً (مثل الراديوم والميزوتوريوم والرادون) أو صناعياً حيث يتم انتاج بعض العناصر المشعة باستخدام المفاعلات

النووية، على سبيل المثال $Co^{60}$، و $Cs^{134}$ و $Ir^{192}$ وغيرها). ونادراً ما تستخدم اليوم المواد المشعة طبيعياً في الفحص الشعاعي صناعياً نظراً لعدم ملاءمة خواصها لعملية الفحص.

تشع النظائر المشعة بصورة عامة عدة أنواع من نواتج التفاعلات النووية مثل أشعة الفا (وهي نوى ذرات عنصر الهيليوم) وبيتا (وهي الكترونات) وكاما (وهي أشعة كهرومغناطيسية كما تم ذكره) وفي بعض الاحيان وعند ظروف معينة تشع نيوترونات (وهي احدى المكونات الأساسية لنواة الذره)، ومن الجدير بالذكر ان أغلب النظائر المشعة تبعث أكثر من نوع واحد من الإشعاعات في آنٍ واحد.

ومن الطبيعي أن يكون الإهتمام منصباً، في تقنية الفحص بأشعة كاما، على النظائر الباعثة لأشعة كاما.

تكون طاقة أشعة كاما، المنبعثة من نظير معين، مميّزةً لذلك النظير، فهي بذلك لاتشابه الأشعة السينية المنبعثة من أنبوبة الأشعة. تكون طبيعة أشعة كاما على شكل خطوط طيفية ضيقة ذات طاقاتٍ مختلفة حسب نوع وطبيعة المصدر المشع.

يعتمد التباين الصوري في الفحص الشعاعي على طاقة الأشعة ، لذلك يجب اختيار النظير الملائم المشع لأشعة كاما على ضوء اعتبارات طبيعية وسمك المادة المراد فحصها ومن ثم ما يتعلق بذلك من زمن تعريض ونوعية الصوره.

**النشاط الشعاعي:**

يمثل النشاط الشعاعي خاصية مهمة للنظير لأنه يؤثر على زمن التعريض و يعرّف بأنه عدد الفوتونات المنبعثة من مصدر الإشعاع بوحدة الزمن . ويعني نشاط مقداره 1 كوري (1 Ci) أن $3.7 \times 10^{10}$ نواة ذرية تنحل (disintigrate) بالثانية الواحدة، وهو مقياس لعدد الفوتونات التي تنبعث بالثانية الواحدة ، يتراوح النشاط

الإشعاعي لمصادر كاما بين عدة مئات من الميلي كوري الى 20000 كوري في التقنية الشعاعية للفحص في الصناعة .

الإضمحلال الشعاعي وعمر النصف:

يرتبط نشاط النظائر المشعة ارتباطاً وثيقاً بالإضمحلال الشعاعي، فشدة الأشعة المنبعثة من المصدر الشعاعي ليست ثابتة حيث أنها تتناقص حسب قانون أسي مع الزمن وكالآتي:

$$N = No\ e^{-\lambda t} \ ............(5\text{-}1)$$

حيث تمثل

$\lambda$: معامل الانحلال وهو ثابت لكل نظير مشع.

t: زمن الانحلال.

N: عدد النوى غير المضمحلة بعد زمن مقداره t .

No: عدد النوى عندما يكون الزمن t= صفراً

e: عدد ثابت = 2.718 وهو أساس اللوغاريتم الطبيعي .

ينحل نصف عدد النوى لذلك النظير بعد فترة زمنية تسمى عمر النصف (half - life) ، ويمكن استخراج عمر النصف من المعادلة (1-5) وكالآتي: عند انقضاء فترة عمر النصف T تكون $N= \frac{No}{2}$

وعند تعويض ذلك في المعادلة (1-5) ينتج

$$\frac{No}{2} = No\ e^{-\lambda t}$$

وبأخذ لوغاريتم الطرفين يكون

$$T= \frac{6.931}{\lambda} \ .................(6\text{-}1)$$

تنحل بعض النظائر ببطء شديد ، حيث يبلغ عمر النصف لها عدة سنوات، في حين ينحل البعض الآخر بسرعة حيث يصبح نشاطها نصف ما كان عليه عند البداية في أيام قليلة (أي أن عمر النصف هو عبارة عن أيام معدودة). هناك بعض النظائر الصناعية لها عمر نصف قليل جداً اي عدة ثواني او قد يكون اقل من ذلك وسوف لايتم التطرق لها هنا.

تكون النظائر المشعة التي عمرالنصف لها قصير غير ملائمة لأغلب الفحوص الشعاعية.

النظائر المشعة المستخدمة في الفحص الشعاعي صناعياً:

يتضمن الجدول (1-3) في ادناه على خواص أهم النظائر المشعة والأكثر شيوعاً بالإستخدام في الفحص شعاعياً بأشعة كاما.

جدول (1-3) يتضمن أهم المعلومات اللازمة في الفحص بالطريقة الشعاعية صناعياً.

| النظير المشع | الرمز | عمر النصف | طاقة الاشعة الاساس(MeV) | النشاط كوري (Ci) | مدى السمك الممكن فحصه للفولاذ (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| كوبلت | Co 60 | 5.3 سنة | 1.17-1.33 | 5 | 150-40 |
| سيزيوم | Cs 137 | 30 سنة | 0.663 | 10 | 75-25 |
| سيزيوم | Cs 134 | 2.1 سنة | 0.48-1.37 | 10 | 100-25 |
| اريديوم | Ir 192 | 74 يوم | 0.296-0.468 | 30 | 60-10 |
| ثوليوم | Tm 170 | 127 يوم | 0.084 | 15 | 13-3 |

يمكن اختيار مصدر أشعة كاما الملائم بموجب المعلومات المتوفرة في جدول (1-3) . يتم الاختيار حسب النوعية المطلوبه للصوره وزمن التعريض وطبيعة الجزء المفحوص الى آخره. مع العلم أنه ليس هناك مصادر مشعة ملائمة للحومات الفولاذ الرقيقة جداً او للحومات سبائك الألمنيوم. يستخدم النظير Ir 192 للمقاطع الرقيقة عادةً حيث يمتلك نصف عمر قصير نسبياً والذي يتطلب التبديل الدوري للمصدر ، كما يمتلك Ir 192 فعالية نوعية عالية وهو متوفر بشدة عالية وقطر صغير.

يمكن استخدام النظير Tm 170 في حالة المقاطع الخفيفة جداً من الفولاذ وحتى ملحومات الألمنيوم إلا أن المصادر المتوفرة ذات فعالية واطئة ولذا يلزم زمن تعريض طويل للحصول على صورة واضحة.

يكون من الممكن الإختيار بين استخدام تقنية الأشعة السينية أو النظائر المشعة فقط عندما تتوفر كافة المعلومات بصوره مضبوطة للتطبيق المعين.

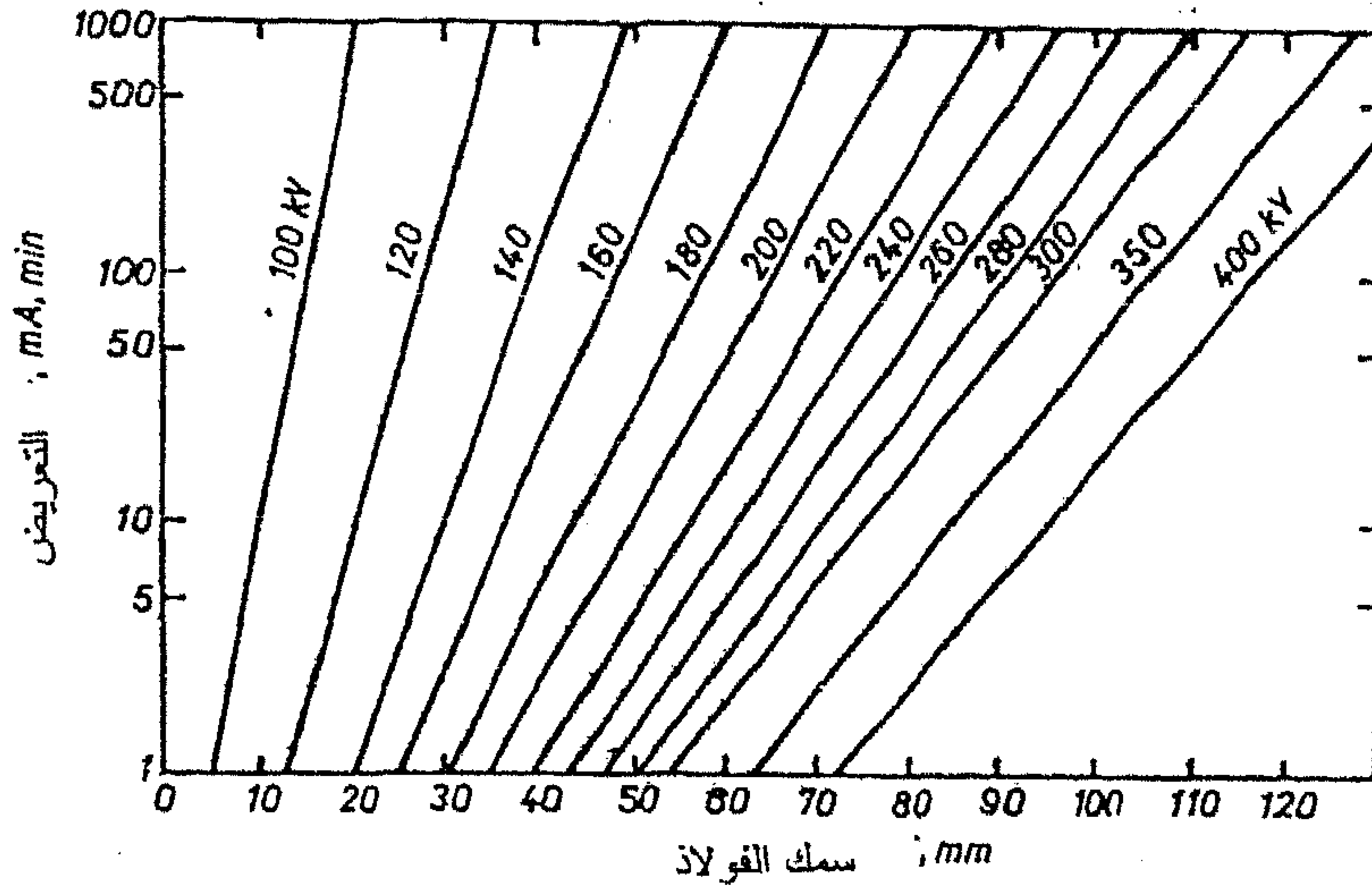
يمكن الفحص ، تحت ظروف خاصة، بعدة إتجاهات عند استخدام المصادر المشعة لأن الأشعة تنبعث منها بكل الاتجاهات فيمكن عندئذ وضع المصدر المشع في مركز كره، على سبيل المثال، ووضع النماذج حوله أو إذا أريد فحص جسم كروي مجوف فيمكن استخدام هذه التقنية، حيث أن هذه الميزة غير متوفرة بهذه المرونة في جهاز الأشعة السينية.

**المقارنة بين أشعتي كاما والسينية:**

يمكن المقارنة بين تقنيتي أشعة كاما والأشعة السينية من حيث المميزات والمساوئ أو القصور في كل منهما كما في الجدول (1-4).

جدول (4-1) المقارنة بين كل من تقنيتي الفحص بأشعة كاما والأشعة السينية:

| الأشعة السينية (X-rays) | أشعة كاما (Gamma- rays) |
|---|---|
| - تتطلب مزود للقدرة الكهربائية ، أما من الخط الكهربائي الأساسي أو من مولد. وهناك في دور التطوير أجهزة تعمل بالبطاريات. | - لاتتطلب اي قدرة كهربائية، مع أن بعض اوعية الحماية من الإشعاع تعمل كهربائياً. |
| - يلزم ملاحظة المقاييس الكهربائية وضبطها أثناء التعريض (العمل) عندما يتطلب الامر ذلك. | - لاتحتاج الى اي إشراف ماعدا لأغراض السلامة من الإشعاع. |
| - الأجهزة ثقيلة وكبيرة بشكلٍ عام. | - المصدر المشع مع اوعية الحماية من الإشعاع خفيفة الوزن، إلا في أحوال معينة. |
| - نصب الاجهزة يستغرق بعض الوقت. وفي بعض الأحيان ليس من السهولة تحقيقه. | - من السهولة نقلها ونصبها عدا في حالة Co-60 حيث تكون الأجهزة كبيرة نسبياً. |
| - يكمن الخطر من الأشعة خلال التعريض حيث أن الجرعة تكون عالية نسبياً أثناء هذه المدة. | - الخطر مستمر لأن الأشعة تنبعث من المصدر تلقائياً وباستمرار. لذا يجب الحذر و المراقبة بصورة مستمرة حتى أثناء النقل والخزن. |
| - يمكن التحكم بطاقة الأشعة المنبعثة (الطول الموجي) وحسب المتطلبات وذلك بتغيير الفولتيه المعجلة. | - لا يمكن التحكم بطاقة الأشعة المنبعثة للمصدر المشع. ويوجد عدد محدد فقط من النظائر المشعة الملائمة. |
| - تخرج الأشعة من الأنبوبة عادةً على شكل مخروط زاويته $60^{0}$ محوره عمودياً على اتجاه الانبوبة. وهناك بعض الأنبوبات الخاصة أيضاً. | - تنبعث الأشعة في كل الإتجاهات، ولغرض السلامة من الإشعاع يغلف المصدر من الجهات غير المطلوبة بحاجز خاص لإمتصاص الأشعة. |
| - يمكن التعريض لفترات قصيرة عند فحص أجسام ذات سمك اعتيادي. | - تكون فترة التعريض طويلة بصوره عامة (قد تصل الى عدة ساعات). |
| - للحصول على تباين جيد يتم اختيار طاقة أشعة (طول موجي) ملائمة حسب سمك ومادة الجزء المفحوص. | - مجال الاختيار قليل جداً (وذلك لقلة المصادر المشعة الملائمة) وكنتيجة لذلك يكون التباين الصوري ، دائماً تقريباً، أقل مما هو عليه في الأشعة السينية. |
| -ثمن الأجهزة عالي كما ان كلفة الصيانة عالية نسبياً أيضاً. | - الكلفة الأولية للأجهزة والصيانة منخفضة. أما كلفة مستلزمات الوقاية من الإشعاع ومتعلقاتها فتكون عالية. |



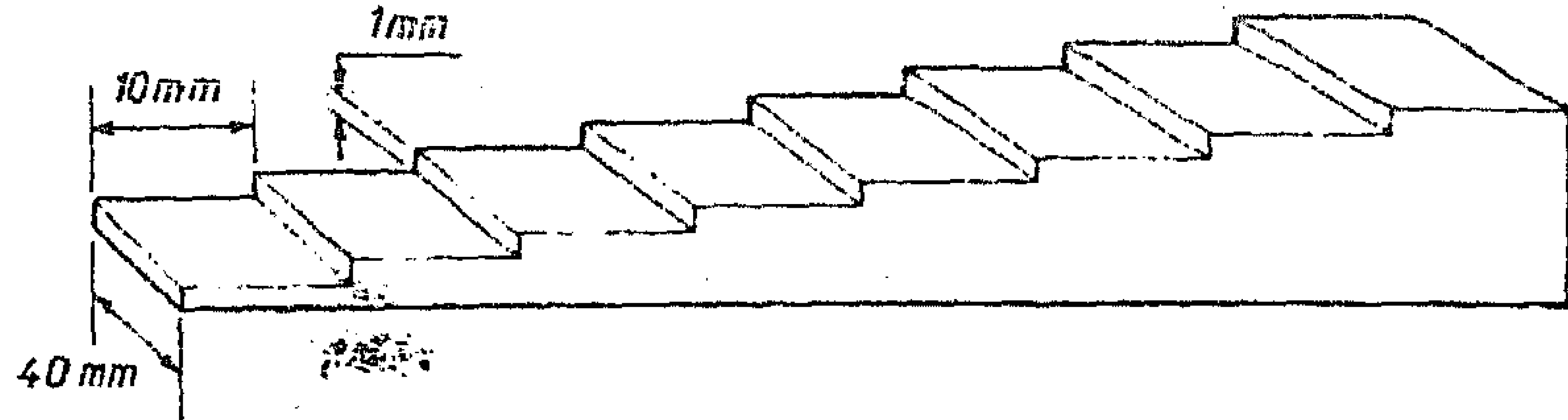

**الشكل (1-28)**

**نموذج لمقدار التعريض عند فولتيات مختلفة ولمختلف أسماك الفولاذ**

## تعيين فترات (أزمات) التعريض:

تزود أجهزة الأشعة السينية بلوحات خاصة تحتوي على منحنيات مرسومة بين زمن التعريض والسمك لمواد مختلفة كالفولاذ والألمنيوم وغيرها ولمختلف الفولتيات كما في الشكل (1-28)، على سبيل المثال.

ومع ذلك فقيم هذه المنحنيات تؤخذ كمؤشرات اوليه للعمل حيث يعتمد عادةً على الخبرة المكتسبة خلال العمل. يمكن رسم مثل هذه المنحنيات إذا تطلب الأمر ذلك ، حيث يتم أخذ عدة صور شعاعية لمدرج من الفولاذ سمك كل خطوة (عتبه) فيه 1 ملم (الشكل 1-29) ولأزمان مختلفة ثم تعاد العملية لعدة فولتيات، يتم رسم المنحنيات باعتبار المحور الصادي ممثلاً لحاصل التيار المار في الأنبوبة (بالملي أمبير) × زمن التعريض( بالدقيقة غالباً) أما السمك فيؤخذ على المحور السيني.




الشكل (1-29) قطعة مدرجة قياسية من الفولاذ .

## تقييم نوعية الصورة Image quality assessment :

يعتمد الكشف عن العيب أو الخلل في الصورة الشعاعية على حدة معالم صورة العيب وتباينها،وكليهما يعتمد بدوره على التقنية المستخدمة . تعتمد حدة المعالم على عدة عوامل منها قطر مصدر الأشعة والمسافة بين المصدر و الفلم، كما أسلفنا، ونوع الفلم والحواجز المستخدمة . أما التباين فيعتمد على الفولتيه المعجله في حالة الأشعة السينية ونوع مصدر أشعة كاما ونوع الفلم والحواجز وطريقة إظهار الصوره (التحميض).

لذا تعتمد نوعية الصوره على هذه العوامل مجتمعة. يمكن اعتبار أحسن نوعية لصورة العيب هي الأدق حدة لمعالم العيب والتباين الصوري العالي له.

ولتخمين نوعية الصوره فمن المعتاد تسجيل صورة اداة (كاشف نوعية الصورة Image Quality Indicator "IQI")مصنوعة من نفس مادة الجزء المراد فحصه او من مادة مشابهة على نفس الفلم وفي نفس الوقت أثناء عملية الفحص. يتألف الكاشف من أجزاء ذات سمك مختلف حيث يوضع على الجزء المراد فحصه بحيث يكون مواجه لمصدر الأشعة. فتكون أحسن نوعية للصوره عند الظهور الأحسن لأرق او أدق أجزاء الكاشف .

## كواشف نوعية الصورة (IQI):

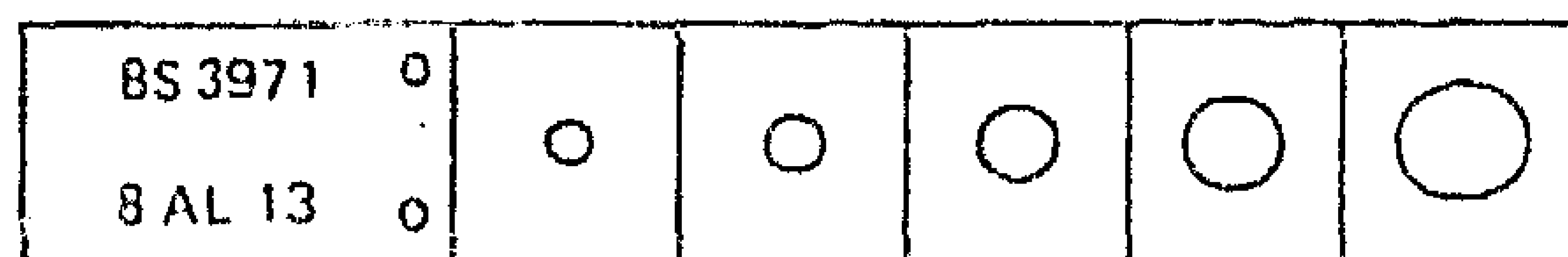
هناك عدة أنواع من الكواشف ومن أهمها نوعين أحدهما يتألف من أسلاك مختلفة الأقطار والآخر من قطعة معدنية متدرجة في السمك بخطوات (عتبات) تحتوي على ثقوب. وقد تبنت بعض المؤسسات والمنظمات العلمية هذين النوعين مثل الجمعية العالمية للحام ومؤسسة المقاييس الألمانية والإنكليزية وغيرها.

## الكاشف ذو الأسلاك:

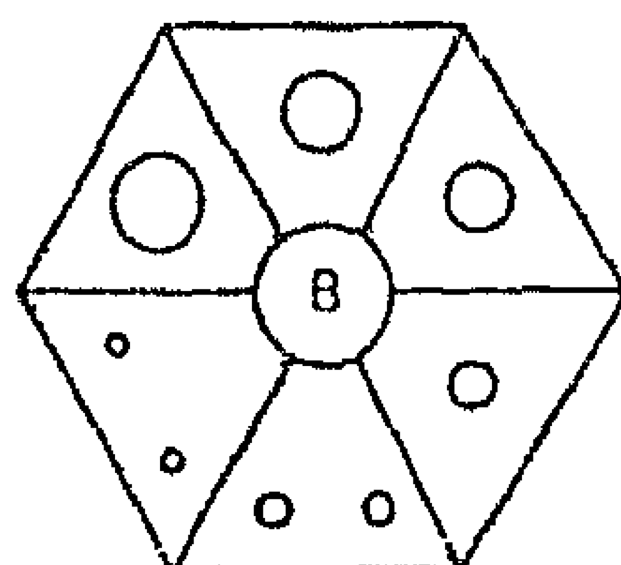
ويتألف هذا النوع من سلسلة من الأسلاك ذات طول ثابت، حوالي 50 ملم ، موضوعة جنباً الى جنب بشكل متواز مفصولة عن بعضها بحدود 5 ملم مرتّبة بالتعاقب حسب الزيادة في القطر ، جدول (1-5) وشكل (1-30). توضع هذه الأسلاك في ثلاثة أكياس صغيرة من النايلون الشفاف بحيث تتكون منها ثلاث مجموعات، تمثل المجموعة الأولى الأسلاك ذات الأقطار الصغيرة والثانية ذات الأقطار المتوسطة ثم الثالثة ذات الأقطار الكبيرة نسبياً.

جدول 1-5 أقطار أسلاك كاشف نوعية الصورة حسب المواصفات البريطانية BS 3971

| رقم السلك | قطره (ملم) | رقم السلك | قطره (ملم) | رقم السلك | قطره (ملم) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.032 | 8 | 0.160 | 15 | 0.80 |
| 2 | 0.040 | 9 | 0.200 | 16 | 1.00 |
| 3 | 0.050 | 10 | 0.250 | 17 | 1.25 |
| 4 | 0.063 | 11 | 0.320 | 18 | 1.60 |
| 5 | 0.080 | 12 | 0.400 | 19 | 2.00 |
| 6 | 0.100 | 13 | 0.500 | 20 | 2.50 |
| 7 | 0.125 | 14 | 0.630 | 21 | 3.20 |

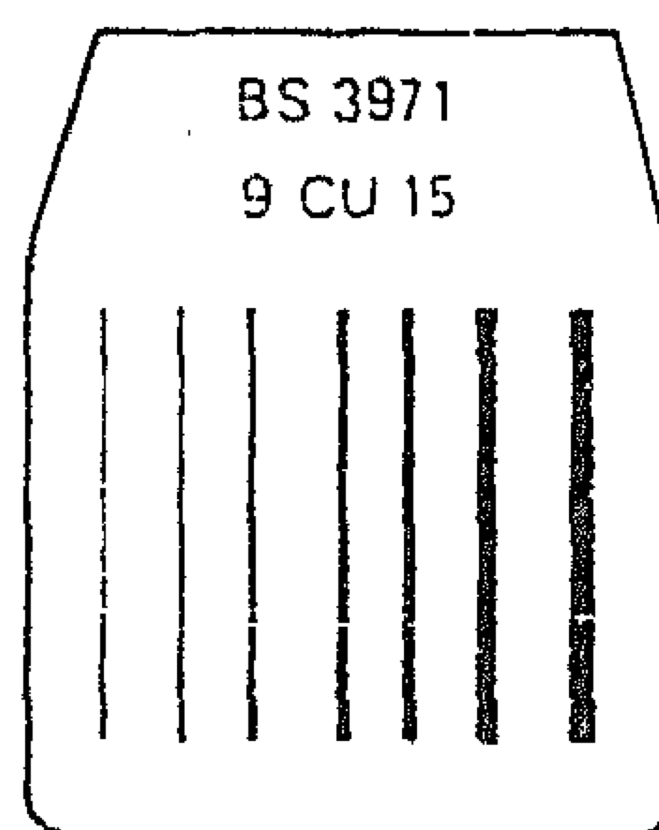



(a)




BS 3971
7 FE 12

(b)




(c)

الشكل 1-30

بعض أنواع كواشف نوعية الصوره حسب المواصفات القياسية البريطانية
(a) النوع المثقب المدرج (b) النموذج السداسي (c) النوع السلكي.

**الكاشف المدرج المثقب:**

ويتألف من لوح او عدد من الألواح لها أسماك مختلفة بالتدريج وكل خطوه (عتبه) فيها ثقب او ثقبين دائريين لها قطر مساوٍ لسمك الخطوه (العتبة) نفسها، كما في جدول (1-6) وشكل (1-30) . تكون عدد قطع الكاشف ثلاثة عادة، تحتوي كل واحدة منها على ستة عتبات في كل عتبة ثقب او ثقبان قطر كل منها مساوٍ لسمك تلك العتبة الواقع فيها.

تعيين حساسية كاشف نوعية الصورة (تقييم نوعية الصورة):

يمكن حساب حساسية التقنية عند استخدام كاشف نوعية الصوره من النوع السلكي او اللوح المحتوي على ثقوب وكالآتي حيث يتم التعبير عنها بنسبة مئوية.

$$\text{الحساسية}\% = \frac{\text{قطر أصغر سلك أوأصغر ثقب مرئي في الصورة}}{\text{سمك الجزء المفحوص}} \times 100$$

جدول 1-6 أقطار ثقوب كاشف نوعية الصورة المساوية لسمك العتبة الموجودة فيها بموجب المواصفات البريطانية BS 3971.

| رقم العتبة | سمك العتبة او قطر الثقب الموجود فيها (ملم) | رقم العتبة | سمك العتبة او قطر الثقب الموجود فيها (ملم) |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.125 | 10 | 1.00 |
| 2 | 0.160 | 11 | 1.25 |
| 3 | 0.200 | 12 | 1.60 |
| 4 | 0.250 | 13 | 2.00 |
| 5 | 0.320 | 14 | 2.50 |
| 6 | 0.400 | 15 | 3.20 |
| 7 | 0.500 | 16 | 4.00 |
| 8 | 0.630 | 17 | 5.00 |
| 9 | 0.800 | 18 | 6.30 |

تعتبر قيم نوعية الصورة (أي ظهور قطر صغير في الصورة عند استخدام الكاشف كمؤشر لصحة ودقة التقنية الشعاعية وتعتمد العملية على سمك الجزء المراد فحصه وطبيعة مادته. يبين الجدول (7-1) اي قطر من الثقوب او من الأسلاك يفترض ظهوره للدلالة على الاستخدام الصحيح للتقنية الشعاعية ولمادة الفولاذ ، علماً بأن الأبعاد مأخوذه بالمليمتر.

الجدول (7-1) أقطار الثقوب او الأسلاك المطلوب ظهورها عند الفحص شعاعياً بالأشعة السينية ولأسماك مختلفة من مادة الفولاذ .

| لأسماك الفولاذ | | الرؤية المطلوبة | |
|---|---|---|---|
| الأعلى من | الأقل او المساوي لـ | للثقوب ذات الأقطار | للأسلاك ذات الأقطار |
| 10mm | 16mm | 0.5mm | 0.2mm |
| 16 | 25 | 0.63 | 0.25 |
| 25 | 32 | 0.8 | 0.32 |
| 32 | 40 | 1.0 | 0.4 |
| 40 | 50 | 1.25 | 0.5 |
| 50 | 80 | 1.25 | 0.63 |

أما الجدول 1-8 فيبين أقطار الثقوب او الأسلاك المطلوب ظهورها عند الفحص شعاعياً بأشعة كاما الناتجة من النظير Ir 142 وعلاقاتها بالأسماك المختلفة للفولاذ.

الجدول 1-8 أقطار الثقوب او الأسلاك المطلوب ظهورها عند الفحص بأشعة كاما (Ir192) ولأسماك مختلفة من الفولاذ (الابعاد بالمليمتر).

| لأسماك الفولاذ | | الرؤية المطلوبة | |
|---|---|---|---|
| الأعلى من | الأقل او المساوي لـ | للثقوب ذات الأقطار | للأسلاك ذات الأقطار |
| 10 | 16 | 0.8 | 0.4 |
| 16 | 25 | 0.8 | 0.4 |
| 25 | 32 | 1.0 | 0.5 |
| 32 | 40 | 1.0 | 0.5 |
| 40 | 50 | 1.25 | 0.63 |
| 50 | 80 | 1.25 | 0.63 |
| 80 | 100 | 1.6 | 1.0 |

يبين الجدول (1-9) المعلومات اعلاه لأشعة كاما الناتجة من النظير Co 60.

تفسير صورة الفلم الشعاعية:

يجب ملاحظة الجزء المراد فحصه جيداً قبل عملية التشعيع وتعيين كل العيوب السطحية وتحديد مكانها جيداً حذراً من حصول الإلتباس بين صور العيوب السطحية والداخلية . ويتم ذلك بواسطة وضع علامات تزيد أو تقلل من سمك النموذج.

جدول (1-9) أقطار الثقوب او الأسلاك المطلوب ظهورها عند الفحص شعاعياً بأشعة كاما (Co 60) ولأسماك مختلفة من الفولاذ (الأبعاد بالمليمتر).

| لأسماك الفولاذ | | الرؤية المطلوبة | |
|---|---|---|---|
| الأعلى من | الأقل او المساوي لـ | للثقوب ذات الأقطار | للأسلاك ذات الأقطار |
| 25 | 32 | 1.25 | 0.8 |
| 32 | 40 | 1.25 | 1.0 |
| 40 | 50 | 1.6 | 1.0 |
| 50 | 80 | 1.6 | 1.25 |
| 80 | 100 | 2.0 | 1.25 |

وقد تم وضع مصطلحات وحروف لتشير الى كل من أنواع العيوب الداخلية، كما أن وصف وصفات بعض هذه العيوب مدرجة في الجدول (1-10).

جدول (I-10) وصف المظهر الشعاعي للأنواع الأساسية من العيوب.

| اسم العيب | الوصف | مظهره في فلم الصوره الشعاعية |
|---|---|---|
| A- فجوات غازية | | |
| $A\alpha$ مسامية | فجوات ناتجة من انحصار الغازات | ظلال داكنة السواد حادة المعالم ذات أشكال دائرية. |
| Ab أنبوبية | فجوات مستطيلة او انبوبية ناتجة من انحصار الغازات | ظلال داكنة السواد حادة المعالم ذات أشكال دائرية او مستطيلة اعتماداً على اتجاه العيوب. |
| B- اكتنافات الخبث | | |
| Ba لها أشكال مختلفة وفي اتجاهات مختلفة | انحصار خبث او أية مادة غريبة أثناء الصهر او اللحام | ظل داكن ذو شكل غير منتظم. |
| Bb خطوط خبث | فجوات مستطيلة تحتوي على خبث او أية مادة غريبة أخرى | خطوط داكنة موازية لحافات اللحام. |
| Bc عيوب الدرز | اكتنافات خبث ناتجة من التقنية الخاطئة لدرز اللحام. | خطوط داكنة |
| C- عدم الإنصهار التام أثناء اللحام | عيبه ذو بعدين ناتج عن نقصان الالتحام بين معدن اللحام والمعدن الأساس. | خط داكن خفيف ذا حافات حادة. اعتماداً على اتجاه العيب نسبة الى اتجاه حزمة الأشعة السينية. وقد يميل الخط الى ان يكون متعرجاً منتشراً. |
| D- النفوذ غير المكتمل في منطقة اللحام | نقصان في الإنصهار في جذر منطقة اللحام او فسحه متبقية نتيجة لفشل اللحام من ملء الجذر. | خط متصل او متقطع في وسط منطقة اللحام. |
| E- شقوق | | |
| Ea – شقوق طولية | عدم تواصل متولد عن انهيار في المعدن | خط اسود خفيف ، مستقيم او ملتوي الاتجاه. |
| Eb- شقوق عرضية | | |
| F- القطع التحتي | اخدود او قناة في سطح اللوح على طول حافة اللحام. | خط داكن، وفي بعض الأحيان عريض ومنتشر ، على طول حافة منطقة اللحام. |

## ٢- الفحص بالنيوترونات شعاعياً:

ان الفحص الشعاعي بالنيوترونات هو نواع من أنواع الفحص اللاأتلافي الذي يستخدم فيه نوع معين من الأشعة الدقائقية التي تسمى النيوترونات لتكوين صوره شعاعية للجزء المراد فحصه.

تتشابه القواعد الأساسية لتكوين الصوره وتباين الامتصاص مع سمك الجزء والعوامل الاخرى التي تتحكم في زمن التعريض والعمليات اللاحقة مع تلك المستخدمة في الطريقة الشعاعية عند استعمال الأشعة السينية وأشعة كاما.

تأتي أهمية الفحص بالنيوترونات في تحسين التباين الصوري في المواد المنخفضة العدد الذري والتمييز بين النظائر او فحص النماذج المشعة.

النيوترونات هي جسيمات دقيقة تتصف بأن لها كتلة كبيره نسبياً وذات شحنة متعادلة.

يختلف امتصاص النيوترونات عن امتصاص الأشعة السينية في ان عملية الامتصاص او التوهين هي عملية تفاعل مع النوى بدلاً من أن تعتمد على التفاعل مع الإلكترونات المدارية حول النواة.

يمكن انتاج النيوترونات من المفاعلات النووية والمعجلات او بعض النظائر المشعة وجميعها تبعث نيوترونات عالية الطاقة نسبياً (نيوترونات سريعة) وحيث ان أغلب الفحص الشعاعي بالنيوترونات يتم باستخدام نيوترونات ذات طاقة منخفضة (نيوترونات حرارية) تكون طاقاتها بين 0.01 الى 0.3 الكترون فولت، فمصادر النيوترونات تحاط عادةً بمهديء (moderator) وهو مادة تختزل الطاقة الحركية للنيوترونات بدون ان تخفّض شدتها بصوره ملحوظة.

لاتتم عملية التصوير بالنيوترونات بواسطة التصوير المباشر على الفلم، لأن النيوترونات لا تؤثر بدرجة كافية على مستحلب التصوير المستخدم في افلام الأشعة السينية.

يصطدم شعاع النيوترونات في بعض هذه التقنيات بحاجز مصنوع من مادة

الدايسبروزيوم (dysprosium) او الانديوم (indium) حيث تمتص النيوترونات وتصبح نظير مشعاً تضمحل بعمر نصف قصير. وفي هذه الطريقة يعرّض الحاجز لوحده لحزمة النيوترونات ثم يتم جعله على تماس مع الفلم آنيا وذلك بتقنية مؤتمته. وقد تتم بطريقة أخرى وذلك بتعريض الحاجز، الذي يبعث أشعة ثانوية ، مباشرةً مع الفلم عند التعريض لحزمة النيوترونات.

تختلف الطريقة الشعاعية بالنيوترونات عن الطريقة الشعاعية المألوفة في أن توهين النيوترونات عند مرورها بالنموذج له علاقة بوجود بعض النظائر بدلاً من الكثافة او العدد الذري. تتوهن الأشعة السينية بدرجة أكبر بالعناصر ذات العدد الذري العالي من العناصر ذات العدد الذري المنخفض اي ان هذه الظاهرة تتأثر بتغيّر العدد الذري. إضافة الى أن الأشعة السينية تتوهن أكثر في المواد عالية الكثافة مما هي عليه في المواد منخفضة الكثافة. أما التوهين بالنسبة الى النيوترونات الحرارية فيقل مع ازدياد العدد الذري بشكل عام، مع أن العلاقة ليست بتلك البساطة بينهما. وبالإضافة الى ذلك فإن بعض العناصر الخفيفة كالهيدروجين و الليثيوم والبورون وبعض العناصر المتوسطة الى الثقيلة وخصوصاً الكادميوم وساماريون ويوروبيوم والكادلينيوم والديسبروزيوم وكذلك بعض النظائر الخاصة لها سعة استثنائية عالية على امتصاص النيوترونات الحرارية. ويعني هذا ان الفحص الشعاعي بالنيوترونات له القدرة على كشف هذه العناصر او النظائر ذات التوهين العالي عند وجودها في جزء او بنيه سعتها الامتصاصية أقل.

تشمل التطبيقات العملية لهذه التقنية فحص المتفجرات المغلفة بمعدن وقطع المعادن المربوطة بمادة لاصقة والمواد المركبة (Composites) المقواة بألياف البورون وفحص طبقات الهيدريدات المرسبة على طبقات معدنية.

يمكن أيضاً استخدام النيوترونات للكشف شعاعياً عن بعض النظائر كبعض نظائر الهيدروجين والكارميوم واليورانيوم، كما أن بعض المواد غير حساسة لأشعة كاما أو الأشعة السينية كأجزاء وقود المفاعل النووي وفي هذه الحالة يمكن فحصها بالنيوترونات شعاعياً.

والواقع فإن ميزات (صفات) الفحص الشعاعي بالنيوترونات تكمّل تلك التي يتمتع بها الفحص الشعاعي بالأشعة السينية او أشعة كاما ، فهذه التقنية لها القدرة على فحص بعض المركبات او الأجزاء التي تعجز عن تحقيقها التقنيات الشعاعية الأخرى.

تستخدم النيوترونات الحرارية بشكل واسع في الفحص لقابليتها العالية على تمييز بعض المواد.

يوضع الجزء المراد فحصه في مسار حزمة النيوترونات امام جهاز كشف الصوره (الكاشف). يمكن الحصول على حزمة النيوترونات من المفاعل النووي والمصادر المشعة او المعجّلات (accelerators). يشتمل الجدول (1-11) على بعض أنواع مصادر النيوترونات الحرارية .

جدول 1-11 بعض أنواع مصادر النيوترونات الحرارية

| نوع المصدر | الشدة الشعاعية النموذجية* | قدرة التمييز | زمن التعريض | الخواص |
|---|---|---|---|---|
| نظائر مشعة | 10 الى $10^4$ | ضعيفة الى متوسطة | طويل | عملية مستقرة، منخفض الى متوسط الكلفة، ممكن حملها. |
| المعجلات (فإن ديكرافت ومولد (d,T) و آلات الأشعة السينية عالية الطاقة) | $10^3$ الى $10^6$ | متوسطة | معتدل | العملية على نحو متقطع، متوسطة الكلفة، قد يمكن حملها |
| التجميع قبيل الحرج Subcritical assembly | $10^4$ الى $10^6$ | جيده | متوسط | عملية مستقرة، متوسط الى عالي الكلفة، يصعب حملها |
| مفاعل نووي | $10^5$ الى $10^8$ | ممتازة | قصير | متوسط الى عالي الكلفة، يصعب حمله |

* وحدات الشدة هي نيوترون على السنتمتر المربع في الثانية.

تتوفر في الوقت الحاضر عدد من المصادر المشعة والجدول (1-12) يتضمن بعض النظائر المشعة المستخدمة عادةً.

**توهين حزمة النيوترونات (Attenuation of Neutron Beam) :**

تتفاعل الإلكترونات والأشعة الكهرومغناطيسية مع الإلكترونات المدارية التي تحيط النواة، في حين ان النيوترونات تتفاعل مع نوى الذرات فقط، فتنحرف النيوترونات عند التفاعل مع النوى وأحياناً يتم امتصاص النيوترون من قبل النواة. فعند اصطدام النيوترون بالنواة، وينحرف فقط، يعطي جزءً من طاقته الحركية الى ا لذره. فعندئذ يتحرك كل من النيوترون والذره باتجاهين مختلفين عن الاتجاه الأساس لحركة النيوترون. تعرف هذه العملية بالإستطاره (Scattering) وهي :

أ- تخفض الطاقة الحركية للنيوترون.

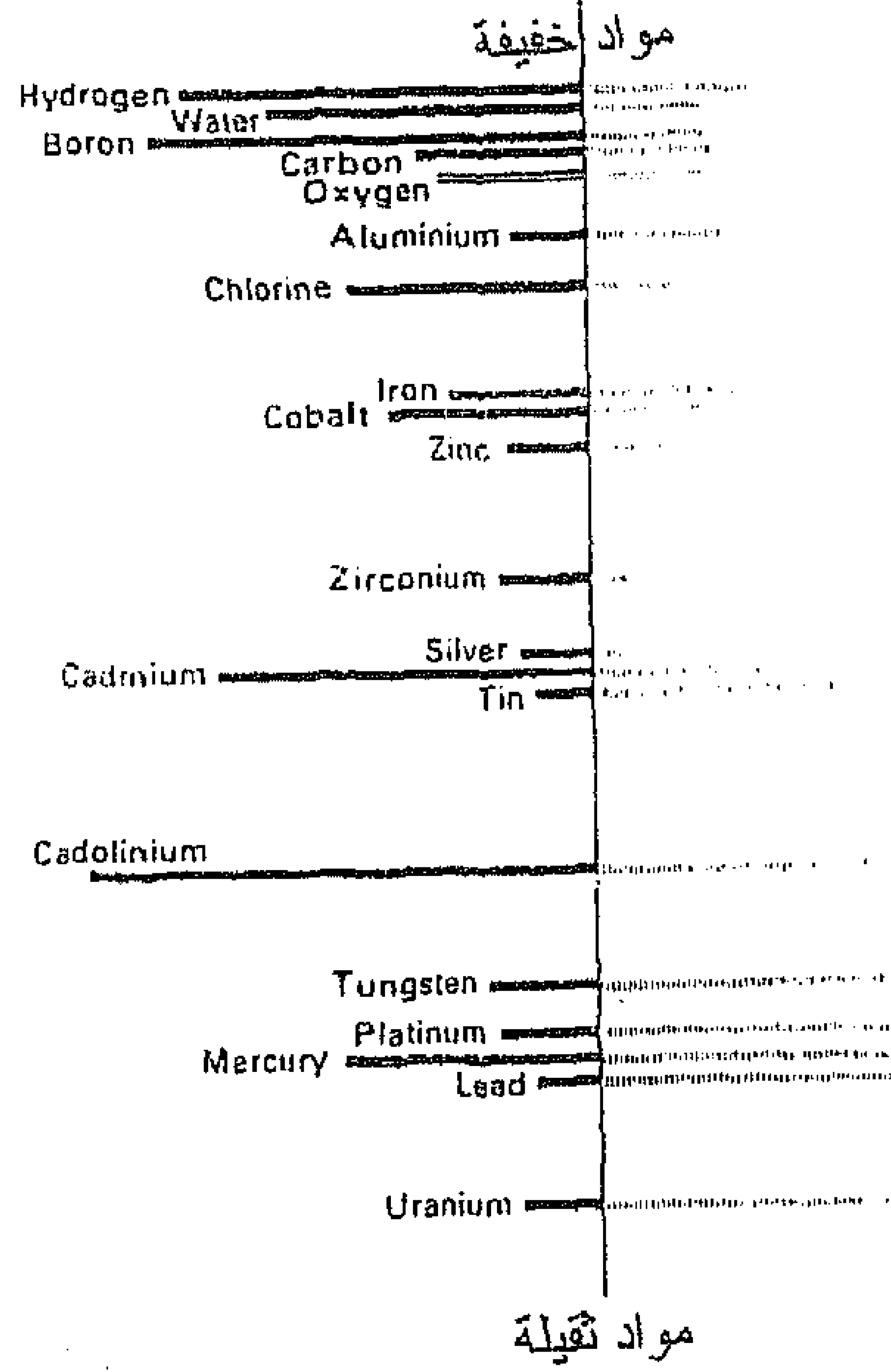
ب- احتمالية مرور النيوترون خلال الجزء المراد فحصه بالإتجاه الذي يسمح للجهاز بكشفه عند وضعه خلف الجزء.

يحصل امتصاص حقيقي للنيوترونات عندما تؤسر من قبل النوى . يبين جدول (1-12) خواص عدة نظائر مشعة تستخدم للفحص الشعاعي بالنيوترونات الحرارية.

| النظير | تفاعل النيوترون | عمر النصف | الصفات |
|---|---|---|---|
| $Sb^{124}$- Be | (ɣ -n) | 60 يوم | عمر نصف قصير، خلفية عالية من أشعة كاما، طاقة النيوترونات واطئة ومن السهولة ان تصبح حرارية، منخفضة الكلفة، مقدار عالي من النيوترونات. |
| $Po^{210}$-Be | ($\alpha$ - n) | 138 يوم | عمر نصف قصير، خلفيه واطئة من أشعة كاما، منخفض الكلفة. |
| $Am^{241}$-$Cm^{242}$-Be | ($\alpha$ - n) | 163 يوم | عمر نصف قصير، ناتج عالي من النيوترونات، كلفة متوسطة. |
| $Cm^{244}$-Be | ($\alpha$ - n) | 18.1 سنة | عمر نصف طويل، خلفية واطئة من أشعة كاما ، منخفض الكلفة. |
| $Cf^{252}$ | انشطار تلقائى | 2.65 سنة | عمر نصف طويل، حجم صغير، طاقة النيوترونات واطئة ومن السهوله ان تصير حرارية. ناتج عالي من النيوترونات. |

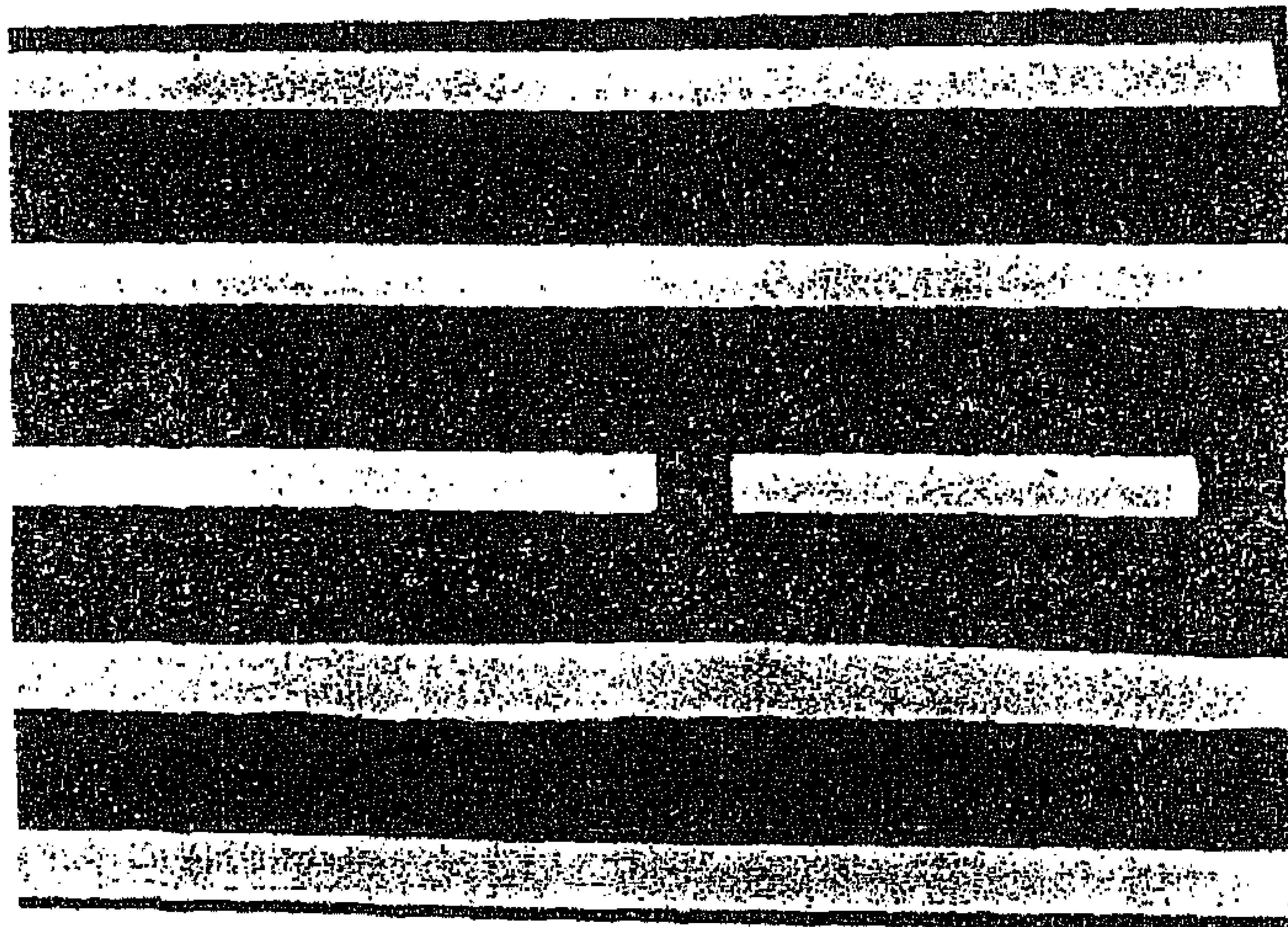
تنتقل النواة الآسرة، نتيجة لأسرها للنيوترون، الى النظير الأعلى لنواة الهدف وفي بعض الأحيان تتولد نواه غير مستقرة حيث تعاني فيما بعد من اضمحلال شعاعي. ان احتمالية التصادم بين النيوترون والنواه والتي تؤدي الى الأسر تعرف بالمقطع العرضي للأسر (Capture Cross section) ويتم التعبير عنها بالمساحة المؤثرة للذره الواحده. يتغير المقطع العرضي للأسر مع طاقة النيوترون والعدد الذري. أما بالنسبة الى النيوترونات الحراري (طاقتها حوالي 0.025 الكترون فولت "ev") فيتغير المقطع العرضي للأسر بصورة عشوائية مع العدد الذري فهو عالي لبعض العناصر ومنخفض نسبياً لعناصر أخرى. يكون تفاعل النيوترونات مع معظم المواد اقل مقارنةً مع الإشعاعات المخترقة الأخرى لذلك تستخدم النيوترونات أحياناً لفحص سمك أكبر مما يتوقع استخدامه في حالة الأشعة الكهرومغناطيسية. يبين الشكل (1-31) مقارنة بين امتصاص بعض المواد للأشعة الكهرومغناطيسية والنيوترونات.يمكن التعبير عن التأثير المشترك للإستطاره والأسر بمعامل امتصاص الكتلة حيث يستخدم هذا المعامل لتعيين عامل التعريض في الفحص الشعاعي بالنيوترونات للجزء المراد فحصه. يتغير التوهين لماده معينه أسياً مع السمك عند الفحص بالنيوترونات تماماً كما في حالة الأشعة الكهرومغناطيسية حيث سبق شرح ذلك بشيء من التفصيل.

هناك العديد من التطبيقات مفصلة في التقرير التقني الخاص ASTM STP 586 حيث يؤكد اهمية وقيمة الفحص الشعاعي بالنيوترونات. فهذه التقنية تستخدم ، على سبيل المثال في فحص المعدات الحربية والمتفجرات و الأجزاء النووية ، كما في شكل 1-32 ، إضافة الى بعض أجزاء معدات الفضاء. وكذلك تستخدم للتأكد من وجود او عدم وجود او لتصحيح أماكن العبوات المتفجرة إضافة الى المواد اللاصقة والحلقات المطاطية (O-Rings) . المستعملة في أجهزة التفريغ ومركبات اللدائن وما شابه ذلك من مواد. يمكن فحص الوقود النووي ومواد السيطرة لتعيين توزيع النظائر فيها وللكشف عن المواد الغريبة وعدم كمال المادة. كما يمكن ملاحظة الترسبات الهيدراتية المترسبة على المعادن او انتشار البورون في المواد المركبة من الياف البورون والمعالجة حرارياً.




الشكل (1-31)

العتمة النسبية للنيوترونات الحرارية مقارنة مع الأشعة السينية المتولدة عند 125kV لبعض المواد الصناعية .



الشكل (1-32) شاعية بالنيوترونات الحرارية لخمسة قضبان من الوقود النووي، أخذت للتأكد من حدوث تغييرات في الأبعاد خلال تشعيعها تمت الصورة باستخدام طريقة شاشة نقل الديسبروزيوم.

## ٥-٤-١ الفحص بطريقة التيارات الدوامة:

يعتمد الفحص بالتيارات الدوامة على قواعد الحث الكهرومغناطيسي وهي انه إذا قطع جسم موصل خطوط المجال المغناطيسي والعكس صحيح اي إذا قطعت خطوط المجال المغناطيسي الجسم الموصل فسيتولد به تيار كهربائي.

يستخدم هذا الفحص للتعرف او التفريق بين مختلف الحالات الفيزياوية و الكيماوية والميتالورجيه للمواد الموصلة كهربائياً سواء كانت مغناطيسية ام غير مغناطيسية، وبناءً على ذلك يمكن استخدام هذه التقنية للأغراض التالية:

١- قياس او التعرّف على بعض ظروف وخواص المادة كالتوصيلية الكهربائية والمنفذيه المغناطيسية والحجم الحبيبي ونوع المعاملة الحرارية والصلادة ،والأبعاد الفيزياوية.

٢- للكشف عن الطيات والثنيات والشقوق والفجوات والاكتنافات.

٣- للتفريق او عزل المعادن غير المتشابهه والكشف عن الفروقات في تكوينها الكيماوي وبنيتها الدقيقة والخواص الأخرى.

٤- لقياس سمك طبقة الطلاء للمواد غير الموصلة على المواد الموصلة أو سمك طبقة المعادن غير المغناطيسية على أساس من معدن مغناطيسي.

بما أن الفحص بالتيارات الدوامة هو تقنية حث كهرومغناطيسي أساساً، فهي لا تتطلب الإتصال المباشر بين المجس (الملف الخاص) والقطعة المراد فحصها. وتمتاز طريقة الفحص هذه بسرعة الإجراء، وحيث أنها طريقة فحص لا أتلافي، فيمكن اذن فحص كامل المنتوج الصناعي وبسرعة إذا تطلب الأمر ذلك.

تمتلك تقنية التيارات الدوامة مزايا ومحدوديات، فتأثرها بعدد كبير من العوامل كالخواص الفيزياوية والبنيوية والكيمياوية يعد من المحاسن والمساوئ في آن واحد. فقد تحجب او تشوش الإشارة الصادرة عن بعض المتغيرات، غير المؤثرة على المادة او أدائها أو على الأقل غير المقصودة، الإشارة الصادرة من المتغيرات الحرجة والمطلوب كشفها وبالتالي قد يؤدي ذلك الى استنتاج خاطئ.

تتوفر الآن تجارياً العديد من أجهزة الفحص بالتيارات الدوامة. تستخدم بعض هذه الأجهزة للفحص الاستكشافي او لفحص الأجزاء البسيطة الشكل. لقد تم ايضاً تصميم أجهزة خاصة لاستخدامها للقطع المعدنية المنتجة من صفائح او قضبان او أنابيب.

**أسس الفحص:**

تتشابه طريقة الفحص بالتيارات الدوامه، من أوجه كثيرة، مع تقنية التسخين بالحث التي تستعمل لتسخين المعادن او تصليدها او مراجعتها. فكليهما يعتمد على الحث الكهرومغناطيسي لتوليد او حث التيارات الدوامة في الجزءالموضوع داخل او بالقرب من ملف واحدٍ او أكثر. يسبب التغيير في التقارب بين الملفات الحاثّة والأجزاء المراد فحصها وكذلك التغيير في الخواص الكهربائية للجزء، تغيرات في التحميل الكهربائي والرنين للمولد.

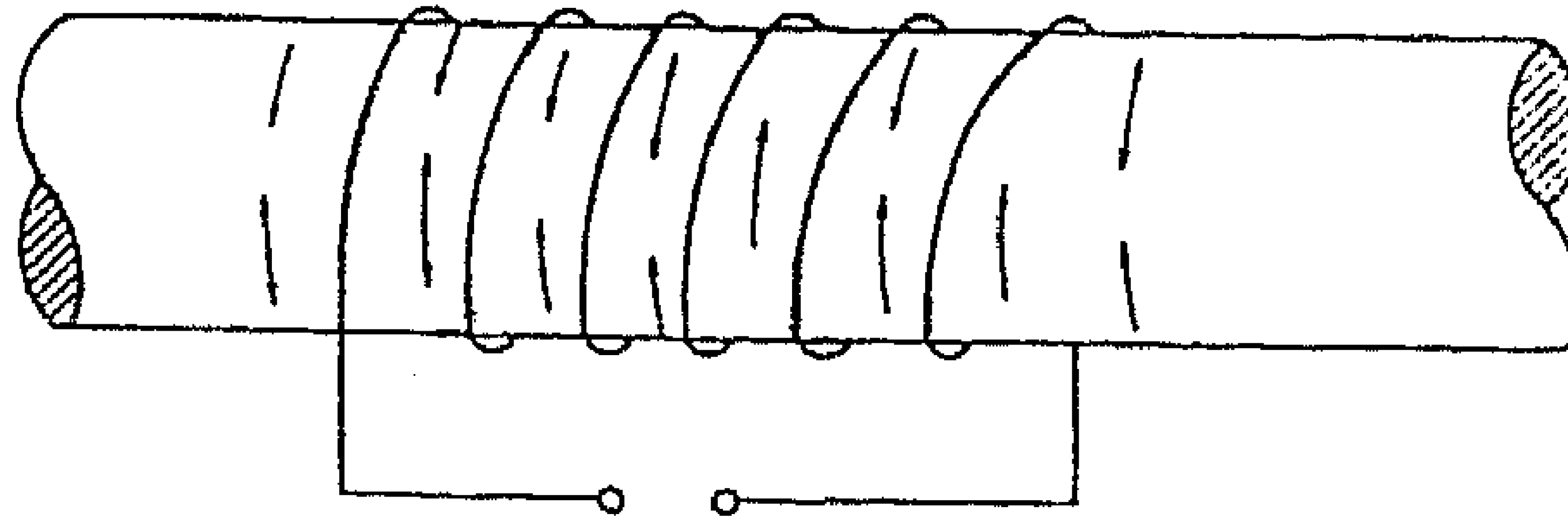
تعمل أنظمة التسخين بالحث عند قدرة عالية في حين أن أنظمة الفحص بالتيارات الدوامة تعمل عند قدرةٍ واطئة جداً، بالمقارنة ، وذلك للتقليل من مستو ى التسخين الناتج. تتم مراقبة التغيير في التحميل الكهربائي، في حالة انظمة التيارات الدوامة، الناتج من التغيير في الأبعاد بوساطة دوائر الكترونية خاصة.

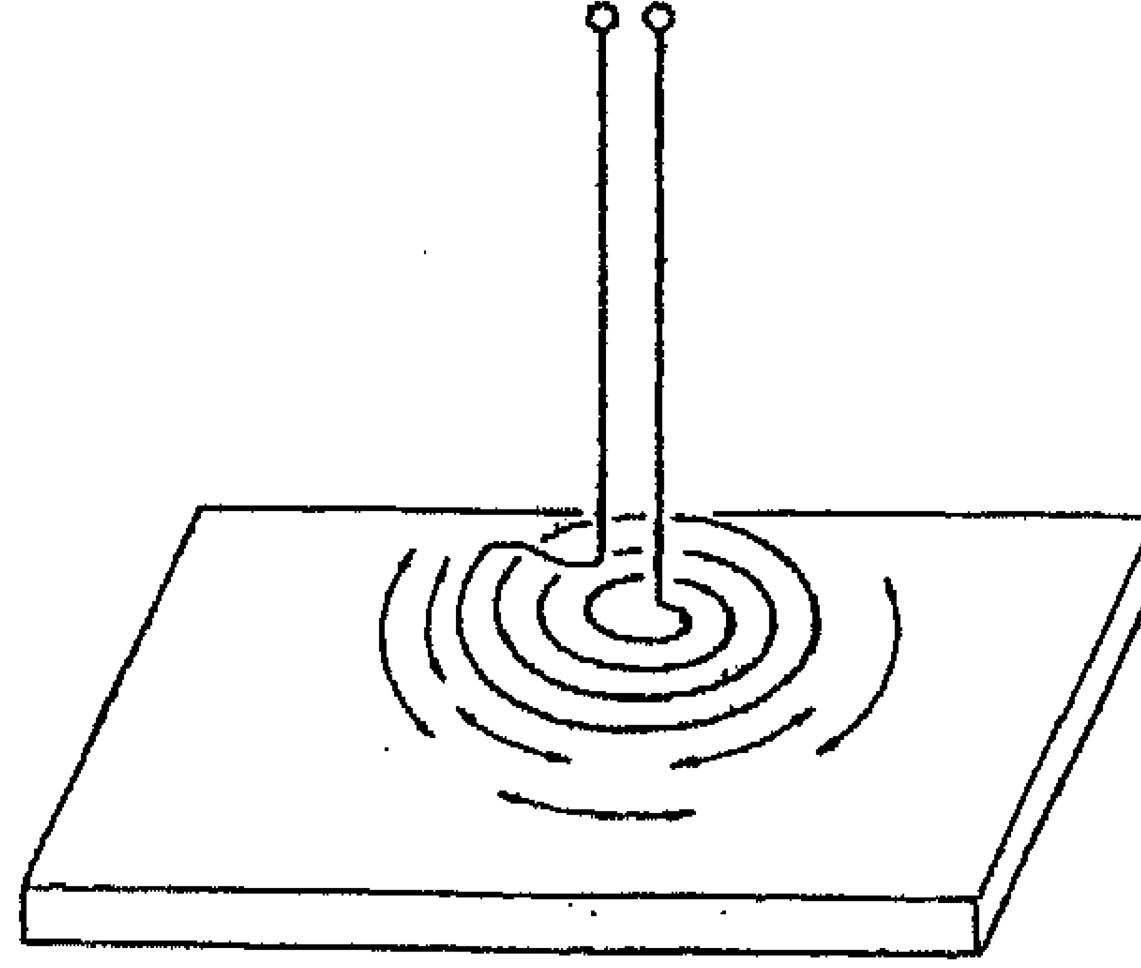
يتأثر مقدار العمق المراد فحصه في الجزء بمقدار التردد المستخدم لأن شدة التيارات الدوامة تكون على أوجها عند السطح وتتدرج في الإنخفاض كلما ابتعدنا عن السطح الى داخل الجزء حتى تصل قيمتها الى الصفر عند مسافة معينة وهذا ما يسمى بالظاهرة السطحية (skin effect).

يختلف تصميم الملفات المستخدمة في التسخين بالحث عن تلك المستخدمة في الفحص بالتيارات الدوامة.

**وظائف نظام الفحص الأساسية:**

يوضع الجزء المراد فحصه في داخل او بالقرب من ملف يمر فيه تيار متناوب كما مبين في الشكل (1-33). يدعى التيار المتناوب هذا بالتيار المهيج (exciting cur-rent) ، والذي يؤدي الى تكوين التيارات الدوامة في الجزء كنتيجة للحث




الشكل 1-33

(a) ملف لولبي حول قضيب يولد تيارات دوامة محيطية

(b) ملف حلزوني مسطح، يولد تيارات دوامة دائرية في لوح معدني مسطح.

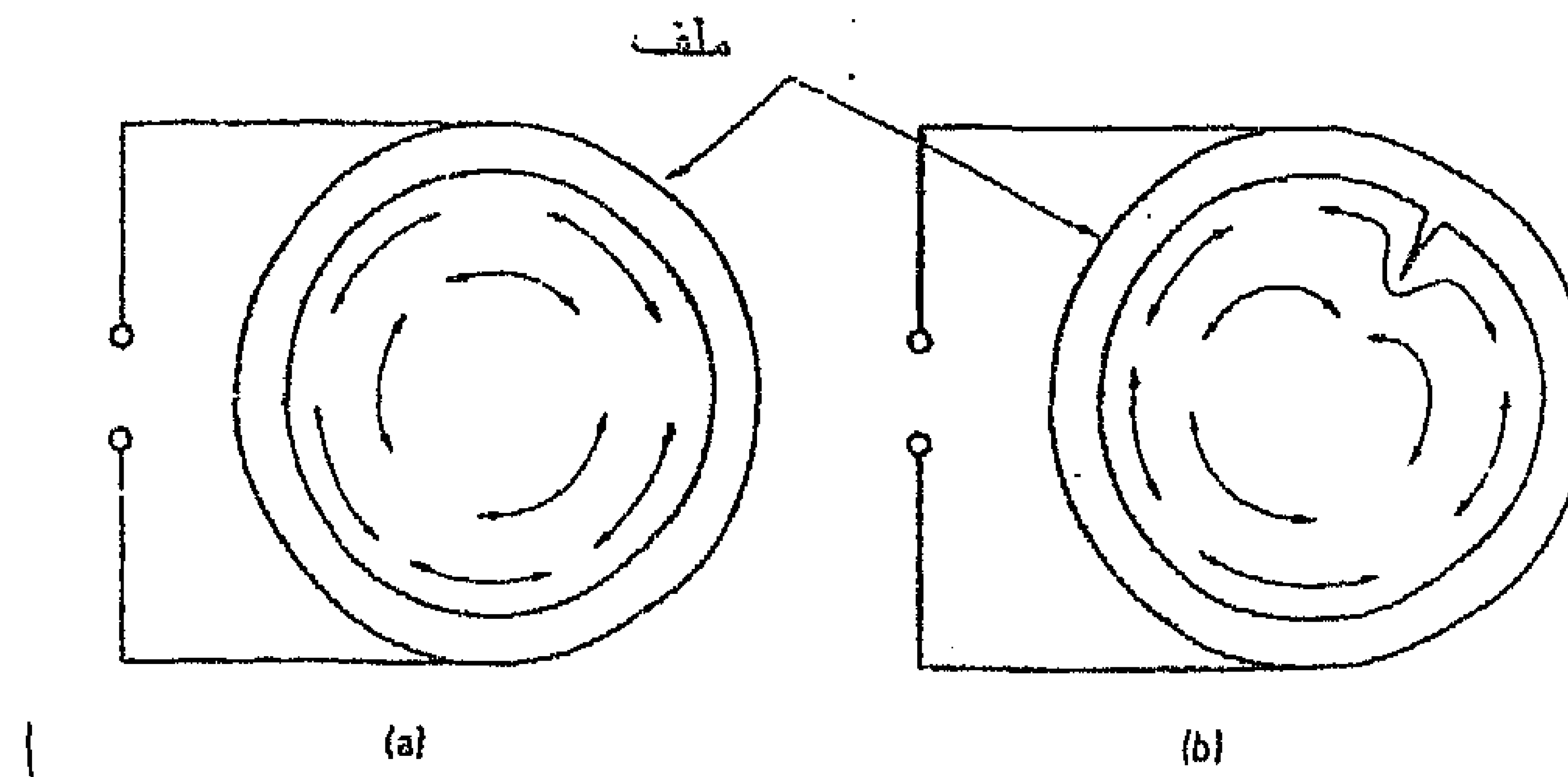
الكهرومغناطيسي. يكون مسار هذه التيارات في الجزء على شكل دوائر مغلقة ويعتمد مقدارها وطورها على:

أ- المجال الكهرومغناطيسي الأساسي المتكون من مرور التيار المهيج في الملف.

ب- الخواص الكهربائية للجزء المراد فحصه.

جـ- المجال الكهرومغناطيسي المتولد نتيجة لمرور التيارات الدوامة في الجزء. يعتمد مقدار المجال الكهرومغناطيسي في الجزء وحوله على كل من التيار المهيج المار في الملف والتيارات الدوامه المارة في الجزء. وتعتمد التيارات الدوامة المارة بالجزء بدورها على الخواص الكهربائية لمادة الجزء ووجود او عدم وجود عيوب او تقطعات في الجزء وأخيراً على المجال الكهرومغناطيسي المتولد في الجزء.

يبين الشكل (1-34) التغيير الحاصل في مسارات مرور التيارات الدوامة الناتج بسبب وجود شق في قضيب ، والقضيب هنا في داخل ملف الفحص اي أن محوريهما متوازيين. لايوجد اي عيب في المقطع (a) لذلك يلاحظ التناظر في مسارات التيارات الدوامة، في حين ان هناك شق في المقطع (b) لذا يعاق جريان التيارات الدوامة ومن ثم يتغير اتجاهها ، حيث يؤدي ذلك الى تغيرات، واضحة في المجال الكهرومغناطيسي المصاحب لها.




الشكل (1-34)

مقطع عرضي للقضيب مع الملف اللولبي، تلاحظ نمط التيارات الدوامة (a) مقطع خالي من العيب ، تلاحظ تيارات دوامة منتظمة (b) نمط التيارات الدوامة المشوه بسبب وجود عيب.

ومما تقدم يتضح انه يمكن مراقبة حالة الجزء بملاحظة تأثير المجال الناتج على الخواص الكهربائية للملف المتهيج مثل الممانعة الكهربائية **impedance** والفولتيه المحتثه او التيارات المحتثه. ويمكن ايضاً مراقبة تأثير المجال الكهرومغناطيسي بملاحظة الفولتيه المحتثه في واحد أو أكثر من الملفات الأخرى الموضوعة داخل المجال بالقرب من الجزء المراد فحصه.

تتباين أنظمة التيارات الدوامة في التعقيد اعتماداً على متطلبات الفحص كل على انفراد إلا أنه يجب تزويد معظم الأنظمة ببعض الأجهزة بحيث يمكن عمل مايلي:

١– تهيج ملف الفحص.

٢– تغيير الإشارة الخارجه لملف الفحص بواسطة الجزء المراد فحصه.

٣– معالجة إشارة ملف الفحص قبل تضخيمها.

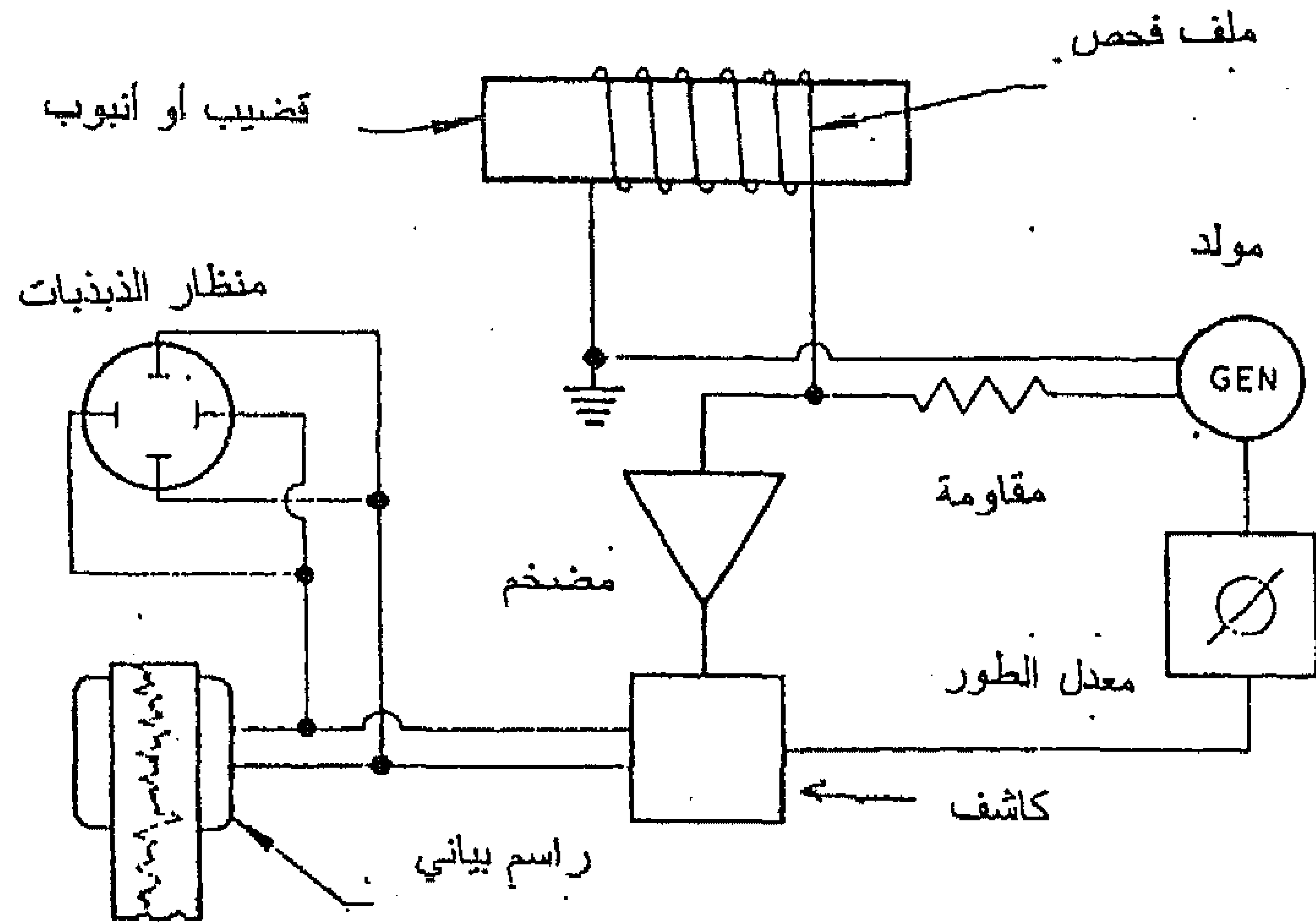
٤– تضخيم إشارة ملف الفحص.

٥– تحسس إشارة ملف الفحص وعادةً ما يصاحب ذلك بعض التحليل او التمييز للإشارات.

٦– عرض الإشارات على مقياس او منظار الذبذبات (oscilloscope) أو راسم الذبذبات او راسم بياني او تسجيل الإشارات على الأقراص المرنة أو الأقراص المدمجة الخاصة بالحاسوب.

٧– مداولة الجزء المراد فحصه وتثبيت مجموعة ملف الفحص.

نلاحظ العناصر الأساسية لنظام الفحص في الرسم التخطيطي (شكل 1-35).
طوّرت الأجهزة الملاحظة في الشكل (1-35) لتلائم فحص القضبان او الأنابيب.




الشكل (1-35)

رسم تخطيطي يبين العناصر الأساسية لنظام الفحص بالتيارات الدوامة.

يزود المولد ملف الفحص بالتيار المهيج ويزامن الإشارة الى مغيّر الطور والذي بدوره يزود الكاشف بإشارات التبديل. يتغيّر المجال الكهرومغناطيسي للملف نتيجة لتحميل ملف الفحص بالجزء المراد فحصه.

تتم تغذية الإشارة الخارجة من ملف الفحص الى جهاز التضخيم ويتم كشفها او تعديلها بالكاشف، ثم تعرض على شاشة عرض منظار الذبذبات (oscillo-scope) او تُرسم بالراسم البياني أو أية وسيلة أخرى.

تتأثر عملية الفحص بالتيارات الدوامة بالمتغيرات الأساسية التالية:

١– ممانعة الملف.

٢– التوصيليه الكهربائية للجزء المراد فحصه.

٣– المنفذية المغناطيسية.

٤– عوامل التباعد والملء.

٥ – الظاهرة السطحية.

٦– تأثير الحافة.

**ممانعة الملف coil impedance**:

يصل المجال المغناطيسي للملف الى مستوى ثابت عندما يمر تيار مباشر فيه وتكون المقاومة الكهربائية للسلك هي المحدد الوحيد لمرور التيار. أما عندما يمر تيار متناوب في الملف فهناك عاملان للتحديد (للإعاقة) هما مقاومة السلك للتيار المتناوب والمفاعلة الحثية (inductive reactance) ($X_L$) . تكون قيمة المقاومة الكهربائية للتيار المتناوب في الملفات المعزولة ( الفارغة القلب) والتي تعمل عند ترددات واطئة او أن قطر سلكها صغير، مقاربة جداً لقيمة مقاومة التيار المباشر لسلك الملف.

تزداد نسبة قيمة مقاومة التيار المتناوب الى قيمة مقاومة التيار المباشر بزيادة

التردد او قطر سلك الملف. تهمل مقاومة سلك الملف غالباً، عند مناقشة أسس التيارات المحتثة، لأنها ثابتة تقريباً. لكنها تتغير بصوره ملحوظة مع درجة حرارة السلك والتردد وتوزيع المجال المغناطيسي الناتج عن الملف.

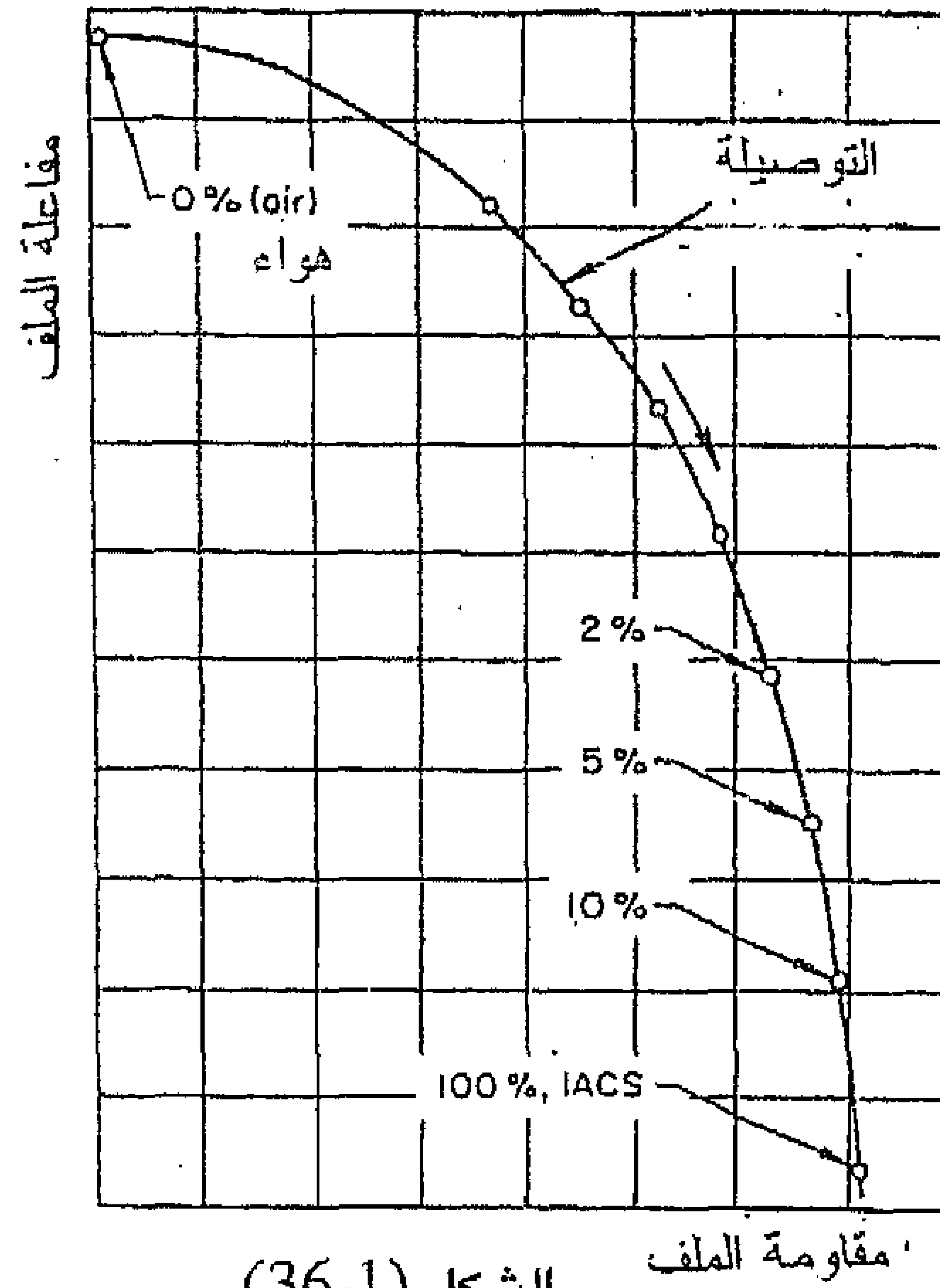
يتحد تأثير المفاعلة الحثيّه للمحاثة (inductance) والتردد ويتم التعبير عنها بالأوم. تسمى مجموع المقاومة للتيار المتناوب في اي ملف بالممانعة "Z" "impedance" وتتضمن كلاً من مقاومة التيار المتناوب "R" والممانعة الحثيثة ($X_L$).

عندما توضع قطعة معدنية بالقرب او في داخل ملف الفحص، يتغير المجال الكهرومغناطيسي الناتج من الملف نتيجة لجريان تيار محثث في القطعة المراد فحصها. وبهذا تتأثر ، بشكل عام ، كل من مقاومة التيار المتناوب والمفاعلة الحثيّة للملف. وتتألف مقاومة الملف المحمّل من مركبتين هي على وجه التحديد مقاومة أسلاك الملف للتيار المتناوب والمقاومة الظاهرية او المزدوجة الناتجة عن وجود القطعة المفحوصة. تنعكس ظروف القطعة المفحوصة (وجود العيوب او عدمه على سبيل المثال) على التغييرات في هاتين المركبتين.

ترسم الممانعة عادةً على مخطط مستوى الممانعة. فترسم المقاومة في هذا المخطط على أحد الإحداثيات وترسم المفاعلة الحثّية (المحاثة) على الآخر. وحيث ان كل ظرف معين للماده المراد فحصها يمكن أن ينتج عنه ممانعة ملف معينه، فيكون كل ظرف مطابق لنقطة معينة على مخطط مستوى الممانعة. فعلى سبيل المثال، إذا وضع الملف على قطع معدنية ذات أسماك مختلفة متدرجة كل لها مقاومية (ρ) مختلفة، فكل قطعة سوف تسبب ممانعة مختلفة في الملف وسوف تتبع لنقط مختلفة على المحل الهندسي لمستوى الممانعة، يشبه المنحنى المتكون، المنحنى الموجود في الشكل (1-36)، والذي يعتمد أساساً على تصنيف (International Annealed Copper Standard) I A C S للتوصيلية. يمكن توليد منحنيات أخرى اعتماداً على متغيرات أخرى للمادة كسمك المقطع ونوع العيوب السطحية.

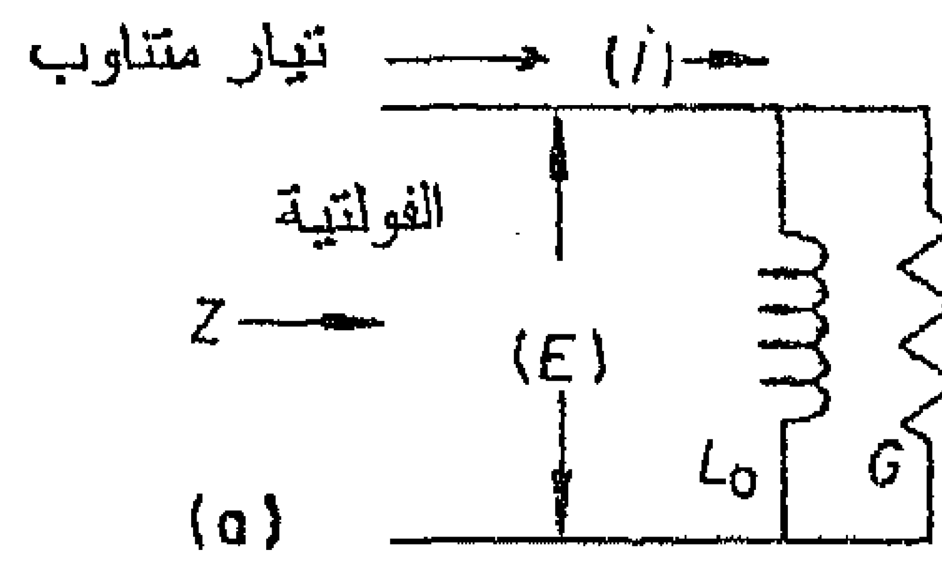
**مركبات الممانعة:**

يبين الشكل (1-37) دائرة مكافئة بسيطة لملف فحص والجزء المراد فحصه.




الشكل (1-36)

رسم مستوى للممانعة النموذجية المستخرجة بواسطة وضع ملف فحص بالتتابع على سلسلة من القطع السميكة،لمعادن ، كل واحدة ، لها قيمة مختلفة من المقاومية الكهربائية او التوصيلية حسب IACS . كان تردد التيار المار بملف الفحص 100kHz .




قانون أوم $Z=\frac{E}{I}$ و $E=IZ$ و $I=\frac{E}{Z}$

الشكل (1-37)

دائرة مكافئة بسيطة لملف فحص والجزء تحت الفحص .

يفترض ان للملف محاثة هي Lo ومقاومة قليلة يمكن إهمالها. يتألف الجزء المراد فحصه من أنبوب خفيف الجدران له توصيل مفرعه G (shunt conductance) موضوع قريباً من الملف. عندما يمر تيار متناوب في الدائرة تحت ظروف الحالة المستقرة،فسوف يخزن قسم من الطاقة في الدائرة وتعود الى المولد في كل دوره والقسم الآخر منها سيضمحل او يفقد على شكل حرارة في كل دورة. فالمفاعلة الحثّية $X_L$، مركبة الممانعة "Z" ، للدائرة الكهربائية تتناسب مع الطاقة المخزونة بالدوره الواحدة اما المقاومة R، مركبة الممانعة، فتتناسب مع الطاقة المضمحلة في الدورة الواحدة. تساوي الممانعة "Z" نسبة معقدة من الفولتيه المسلطة (E) مقسومة على التيار وحسب قانون اوم.

الشكل 1-38

(d,c,b) مخططات الممانعة لثلاث حالات للدائرة المكافئة في (a) اي الشكل 1-37 .

يستعمل اصطلاح معقدة ليشير، بشكل عام، الى أن التيار المتناوب والفولتيه ليستا بنفس زاوية الطور.

يبين الشكل (1-38) ثلاثة مخططات ممانعة لدائرة مكافئة لتلك التي في الشكل (1-37) ولثلاث ظروف . تكون الدائرة عند وجود الملف مفاعله فقط، كما في (1b-38)، اي أن :

$$Z = X_L = wL = 2\pi fL \quad \text{.................(1-7)}$$

حيث تمثل L المحاثة الذاتية و f التردد.

أما عند وجود التوصيل (conductance) لمكافئ الدائرة (وهي الحالة الافتراضية للوجود الفعلي للملف الفحص والجزء المراد فحصه) فالممانعة تولد مقاومة نقيه اي أن $R = \frac{1}{G} = Z$ ، كما في الشكل (1-38c). أما عند ربط كلاً من الملف والتوصيل فالممانعة لها مركبتين أحدهما للمفاعلة والأخرى للمقاومة بشكل عام وعندها تكون $Z=\sqrt{R^2+XL^2}$ كما في الشكل (1-38d) تكون R المقاومة على التوالي ، XL المفاعلة على التوالي. تشترك الزاوية θ مع الممانعة وهذه الزاوية دالة للنسبة بين مركبتي الممانعة R و XL . وتظهر قيمة الزاوية θ في الشكل (1-38d) مساوية للزاوية 45 تقريباً.

يمكن أن تبين النقاط والمحال الهندسية على مخططات مستوى الممانعة باستخدام التمثيل الطوري وذلك للعلاقة الوثيقة بين مخططات الممانعة والمخططات الطورية حيث ان فولتيه الاشارة تتناسب تناسباً مباشراً مع الممانعة عند ثبوت التيار.

**التوصيلية الكهربائية:**

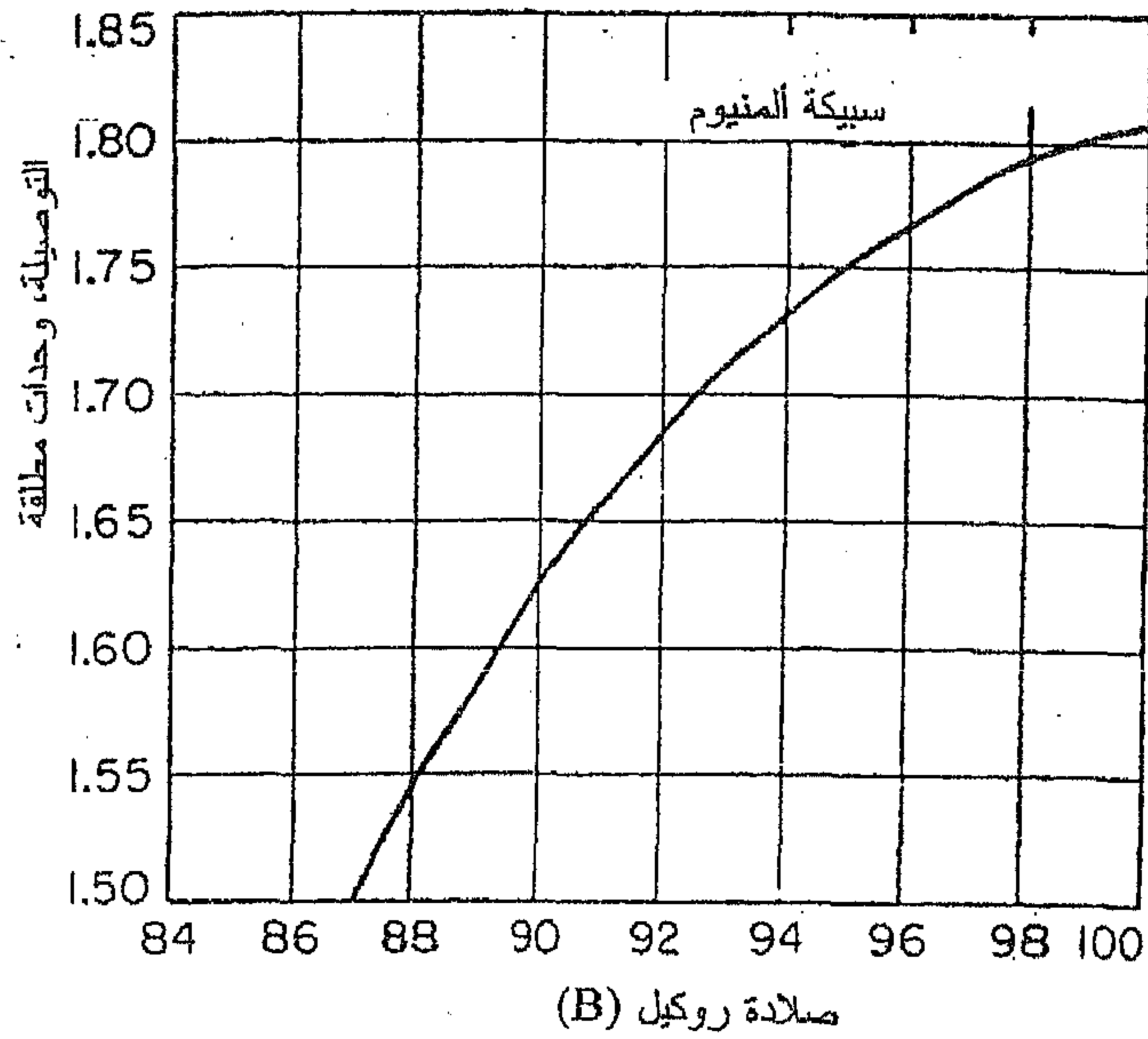
لجميع المواد مقاومة مميزة لمرور التيار الكهربائي. تصنف المواد التي لها مقاومية عالية جداً على أنها عوازل ، أما المواد ذات المقاومية المتوسطة فتصنف على أنها شبه موصلة، في حين تصنف المواد التي لها مقاومية (ρ) قليلة على أنها مواد موصلة. تكون المواد الموصلة، التي تتضمن أغلب المعادن، ذات اهمية كبيرة في فحص التيارات الدوامه. تتغيّر التوصيلية النسبية لعامة المعادن والسبائك على مدى واسع جداً.

يمكن ان تقاس قابلية المواد لتوصيل التيار بدلالة التوصيلية او المقاومية تكون القياسات في الفحص بالتيارات الدوامة تعتمد في الغالب على النحاس القياسي العالمي الملدن (IACS) . تم جعل التوصيلية النسبية للنحاس النقي الملدن في هذا النظام هي 100% ، ويُعبر عن توصيلية بقية المعادن بالنسبة المئوية لهذه القيمة القياسية. فعلى سبيل المثال تصنّف توصيلية الألمنيوم النقي على أنها IACS 61% أو 61% من تلك التي للنحاس النقي. أن قيم المقاومية وتصنيف التوصيلية لبعض المعادن والسبائك الشائعة مدرجة في الجدول (1-13) .

جدول (1-13) قيم المقاومية والتوصيلية لبعض المعادن والسبائك الشائعة.

| المعدن او السبيكة | المقاومية أوم.سم $\times 10^{-6}$ | التوصيلية IACS% |
|---|---|---|
| الفضة | 1.63 | 105 |
| النحاس الملدن | 1.72 | 100 |
| الذهب | 2.44 | 70 |
| الألمنيوم | 2.82 | 61 |
| سبائك الألمنيوم | | |
| 6061-T6 | 4.1 | 42 |
| 7075-T6 | 5.3 | 32 |
| 2024-T4 | 5.2 | 30 |
| المغنيسيوم | 4.6 | 37 |
| النحاس الأصفر(30-70) | 6.2 | 28 |
| برونزيات الفوسفور | 16 | 11 |
| سبيكة المونيل (Monel) | 48.2 | 3.6 |
| الزركونيوم | 50 | 3.4 |
| زرك الوي-2(Zircaloy-2) | 72 | 2.4 |
| التيتانيوم | 54.8 | 3.1 |
| سبيكة Ti-6Al-4V | 172 | 1.0 |
| الفولاذ المقاوم للصدأ 304 | 70 | 2.5 |
| انكونيل600(Inconel 600) | 98 | 1.7 |
| هاستيلويX(Hastelloy X) | 115 | 1.5 |
| واسبالوي (waspaloy) | 123 | 1.4 |

تؤثر عوامل عديدة على توصيلية المعدن وبالأخص درجة الحرارة والتكوين الكيماوي والمعاملة الحرارية وما ينتج من بنية مجهرية والحجم الحبيبي والصلادة والاجهادات المتخلفة. والعكس صحيح حيث يمكن استخدام التيارات الدوامة لاختبار التكوين الكيماوي ومختلف الصفات الميتالورجيه بشرط ان تأثيرها على التوصيلية كافٍ للتزويد بالتباين الضروري للفحص . فعلى سبيل المثال يمكن اختبار المعاملة الحرارية لسبائك الألمنيوم القابلة للتصليد بالتعتيق بسبب التأثير الواضح للصلادة على التوصيلة (الشكل 1-39) .




الشكل (1-39)

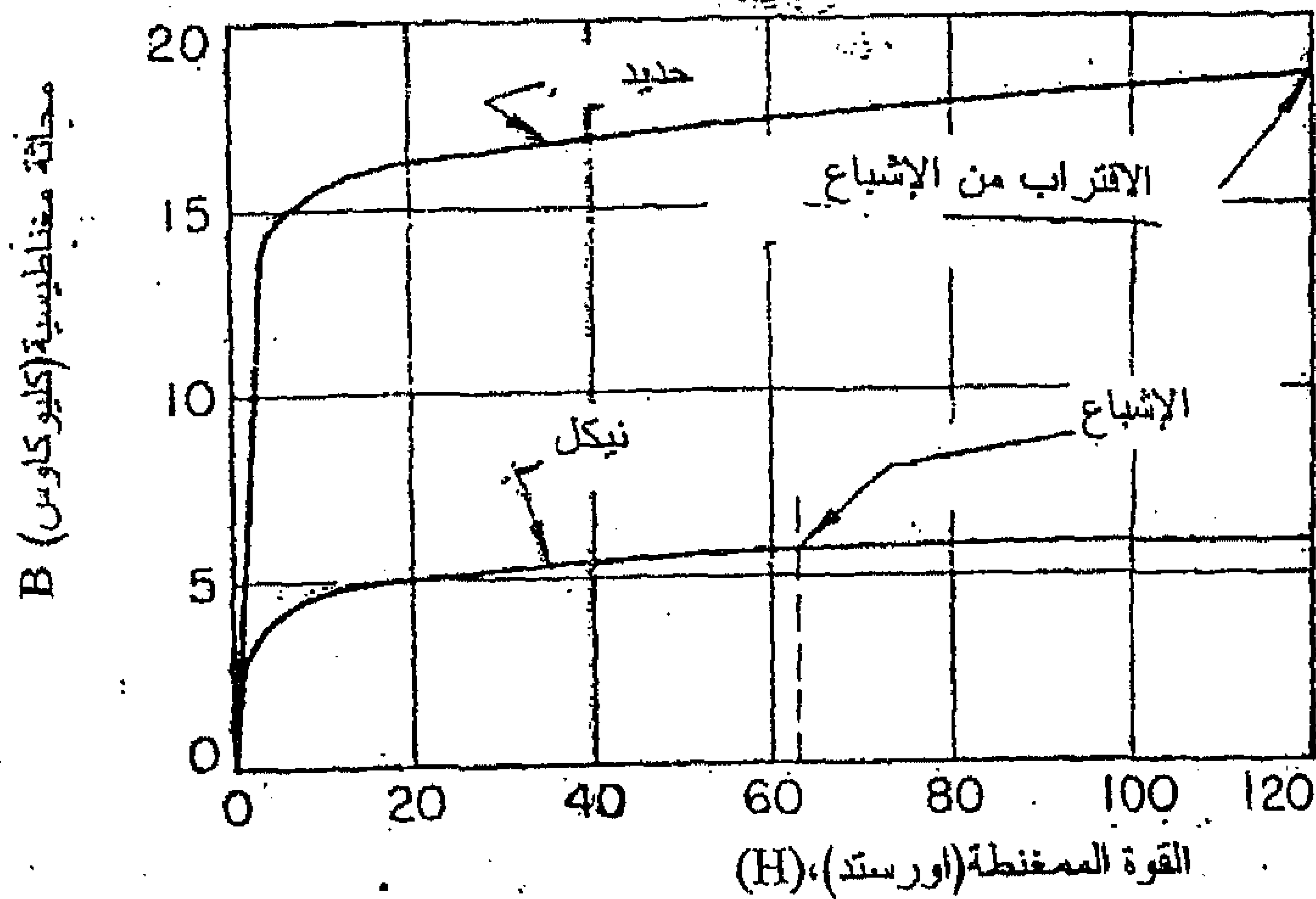
العلاقة بين الصلادة والتوصيلية الكهربائية لسبيكة من الألمنيوم قابلة للتعامل الحراري والتي تسمح للتيارات الدوامة بمراقبة المعاملة الحرارية لها.

**المنفذية المغناطيسية:**

تعمل المعادن المغناطيسية (القابلة للتمغنط) وسبائكها، ومنها الحديد والنيكل والكوبلت وبعض سبائكها، على تركيز فيض المجال المغناطيسي فهي تنجذب بقوة

نحو المغناطيس ولها قابلية على التمغنط عالية جداً وهي متغيرة كما أن لها منفذيات عالية جداً ومتغيرة أيضاً.

ان المنفذية المغناطيسية ليست مقداراً ثابتاً للمادة الواحدة بل تعتمد على شدة المجال المغناطيسي المؤثر عليها. فإذا تأملنا على سبيل المثال، نموذج من الفولاذ أزيلت مغناطيسيته تماماً ثم وضع داخل ملف حلزوني . فكلما يزداد التيار المار في الملف فالمجال المغناطيسي المتكون من هذا التيار يزداد أيضاً. فيزداد الفيض المغناطيسي في الفولاذ بسرعة في البداية ثم ينخفض معدل الزيادة بحيث أن الزيادة الاضافية الكبيرة في شدة المجال المغناطيسي ستولد زيادة صغيرة في الفيض داخل الفولاذ. فعندئذ يقال ان الفولاذ قد وصل الى ظروف التشبع المغناطيسي. يعرف المنحنى الذي يبين العلاقة بين شدة المجال المغناطيسي والفيض المغناطيسي داخل الفولاذ بمنحنى التمغنط يبين الشكل (1-40) منحنيا التمغنط للفولاذ والنيكل الملدنيين والنقيين نقاوة تجارية. فالمنفذية المغناطيسية للمادة هي النسبة بين شدة المجال المغناطيسي ومقدار الفيض المغناطيسي في المادة. وكما يبدو من الشكل (1-40) تكون المنفذيه المغناطيسية عند منطقة التشبع (اي عندما لايكون هناك زيادة يعتد بها في الفيض المحتث في المادة عند تغيير شدة المجال) ثابتة تقريباً مع التغييرات الصغيرة في شدة المجال.




الشكل (1-40)

منحنيا التمغنط للحديد و النيكل النقيين نقاوة تجارية والملدنيين

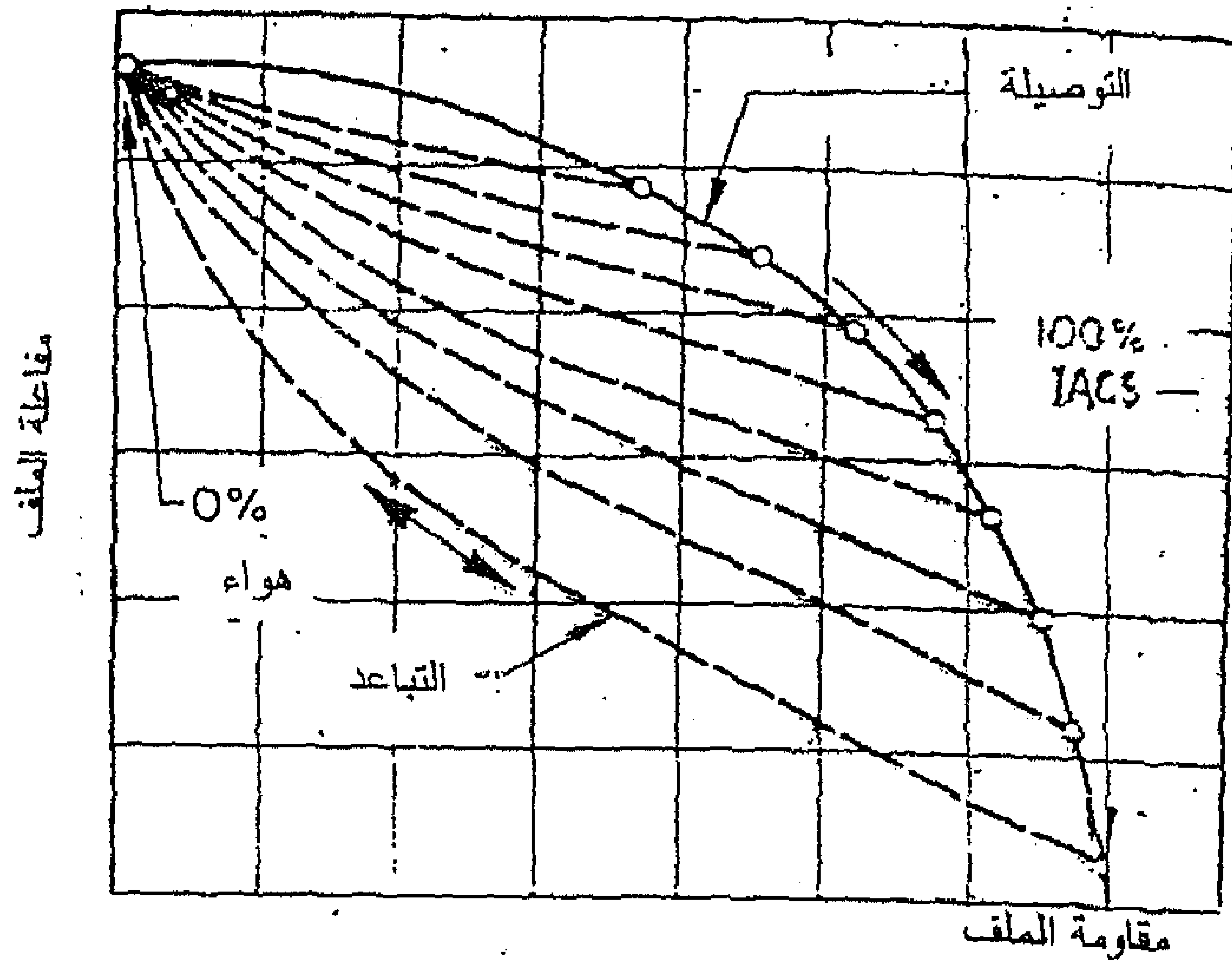
تؤثر المنفذية المغناطيسية، للمادة المراد فحصها، بشدة على استجابة التيارات الدوامة، لأن التيارات الدوامة يتم حثها بوساطة مجال مغناطيسي متغير. ولهذا السبب فإن التقنية والظروف المستخدمة في فحص المواد المغناطيسية تختلف عن تلك المستخدمة لفحص المواد غير المغناطيسية. مع ان نفس العوامل التي توثر على التوصيلية الكهربائية للمادة (كالتكوين الكيماوي والصلادة والاجهادات المتخلفة والعيوب البلورية) يمكن أن توثر أيضاً على المنفذية المغناطيسية. لذلك يمكن استخدام تقنية التيارات الدوامة لفحص كل من المواد المغناطيسية وغير المغناطيسية، ومع ان المواد الموصلة المغناطيسية لها توصيلية كهربائية ايضاً وتتغير مع تغيّر ظروف المادة، فإن تغييرات المنفذيه بشكل عام لها تأثير أكبر بكثير على استجابة التيارات الدوامة من متغييرات التوصيلية عند ترددات الفحص الواطئة.

يمكن استخدام ظاهرة ثبوت المنفذية المغناطيسية للمواد المغناطيسية في حالة التشبع للسماح بفحص المواد المغناطيسية بتقنية التيارات الدوامة مع انخفاض شديد لتأثير التغييرات في المنفذية المغناطيسية. فيوضع الجزء المراد فحصه داخل الملف الذي يمر به تيار مباشر، حيث يجب أن يكون مقدار التيار المستخدم كافياً لتحقيق التشبع المغناطيسي للجزء. يوضع ملف الفحص داخل الملف المولد للمجال المغناطيسي المشبع وقريباً جداً من الجزء المراد فحصه. تستخدم هذه التقنية بصوره عامة عند فحص التقطعات في المواد المغناطيسية، لأن التغيير الطفيف في المنفذية ليس بذي شأن وربما يؤدي الى رفض المادة المقبولة.

**عامل التباعد:**

عند تزويد مجس ملف الفحص، المربوط بجهاز الفحص الملائم ، بالطاقة في الهواء، فسيعطي إشارة حتى ولو لم يكن هناك مادة موصلة بالقرب منه. تبدأ هذه الإشارة بالتغيّر كلما اقترب الملف من المادة الموصلة، وبما أن المجال المغناطيسي للملف يكون على أشده قريباً جداً من الملف فيستمر التغيير المشار اليه بالزيادة حتى يوضع الملف مباشرة على المادة الموصلة. تدعى التغييرات في الاشارة التي تحدث مع التغييرات في المسافة الفاصلة بين الملف والمادة الموصلة (الجزء تحت الفحص) بعامل التباعد (Lift-off factor).

ان تأثير التباعد من الوضوح بمكان بحيث ان أي تغيير في المسافة الفاصلة قد يحجب عدة إشارات ناتجة عن الظروف او الحالة التي يلزم البحث عنها. ولهذا يكون من الضروري المحافظة على علاقة ثابتة بين حجم وشكل الملف من جهة وحجم وشكل الجزء المراد فحصه. وتعود الصعوبة الشديدة في اداء الفحص الذي يتطلب مسح الجزء المعقد الشكل الى تأثير التباعد ايضاً. يمكن استنباط التغيير في ممانعة الملف مع التباعد من مخطط مستوى الممانعة المبين في الشكل (1-41). فعند تعليق الملف في الهواء بعيداً عن الجسم الموصل ، تكون الممانعة عند نقطة النهاية العليا للمنحنى عند اليسار الأقصى. وتتحرك الممانعة باتجاه الخطوط المتقطعة حتى يكون الملف على تماسٍ مع الجسم الموصل. وعند حصول التماس تكون الممانعة عند نقطة متعلقة بممانعة الجزء المراد فحصه والتي تمثل في هذه الحالة التوصيلية .




الشكل 1-41

رسم مستوى الممانعة يبين منحنيات التوصيلية الكهربائية ومقدار التباعد (Lift- off). التردد عند الفحص 100k Hz

وبالرغم من ان ظاهرة التباعد قد تكون مزعجة في العديد من التطبيقات، إلا أنه يمكن الإستفادة منها أيضاً. على سبيل المثال، يمكن استغلال ظاهرة التباعد بصورة مثالية في أجهزة قياس سمك طلاء المواد العازلة كالأصباغ وطلاء الأنودة على المعادن.

**عامل الملء:**

يسمى عامل التباعد في حالة المقارنة مع الملف المحيط بالجزء المراد فحصه بعامل الملء. وهو عبارة عن مقياس لمدى ما يملأه الجزء المفحوص من ملف الفحص. وتحصل التغييرات في عامل الملء، كما هو الحال في عامل التباعد من بعض العوامل كالتغييرات في القطر الخارجي للجزء المراد فحصه لأن أي تغيير صغير يمكن أن يعطي إشارات كبيرة. تشبه منحنيات التباعد المبينه في شكل (1-41) منحنيات عامل الملء الى حدٍ بعيد. ينزاح منحنى التوصيلية الى مكانٍ جديد عند قيمة معينة لعامل التباعد او الملء كما مشار اليه في الشكل (1-41) . يستخدم عامل الملء في بعض الأحيان كطريقة سريعة لفحص التغييرات في مقدار (قياسات ) القطر الخارجي للقضبان المعدنية .

**تأثير الحافة:**

تتشوه التيارات الدوامه عندما يقترب ملف الفحص من نهاية او حافة الجزء المراد فحصه بسبب عدم امكانيتها من الجريان (الإنسياب) وراء حافة الجزء . ينتج التشويه في التيارات الدوامة إشارة تُعرف بتأثير الحافة . يؤدي تأثير الحافة الى تقييد الفحص قرب الحافات بسبب ماله من تأثير كبير. لايمكن التخلص من تأثير الحافة نهائياً مغايراً بذلك تأثير عامل التباعد . ان تقليص حجم الملف سوف يقلل الى حد ما من تأثير الحافة، إلا أن هناك حدود عملية تفرض حجماً معيناً لكل تطبيق. وعلى أية حال فلا ينصح بالفحص عندما يكون الملف أقرب من 3 ملم من حافة الجزء.

**تأثير الجلد (السطح):**

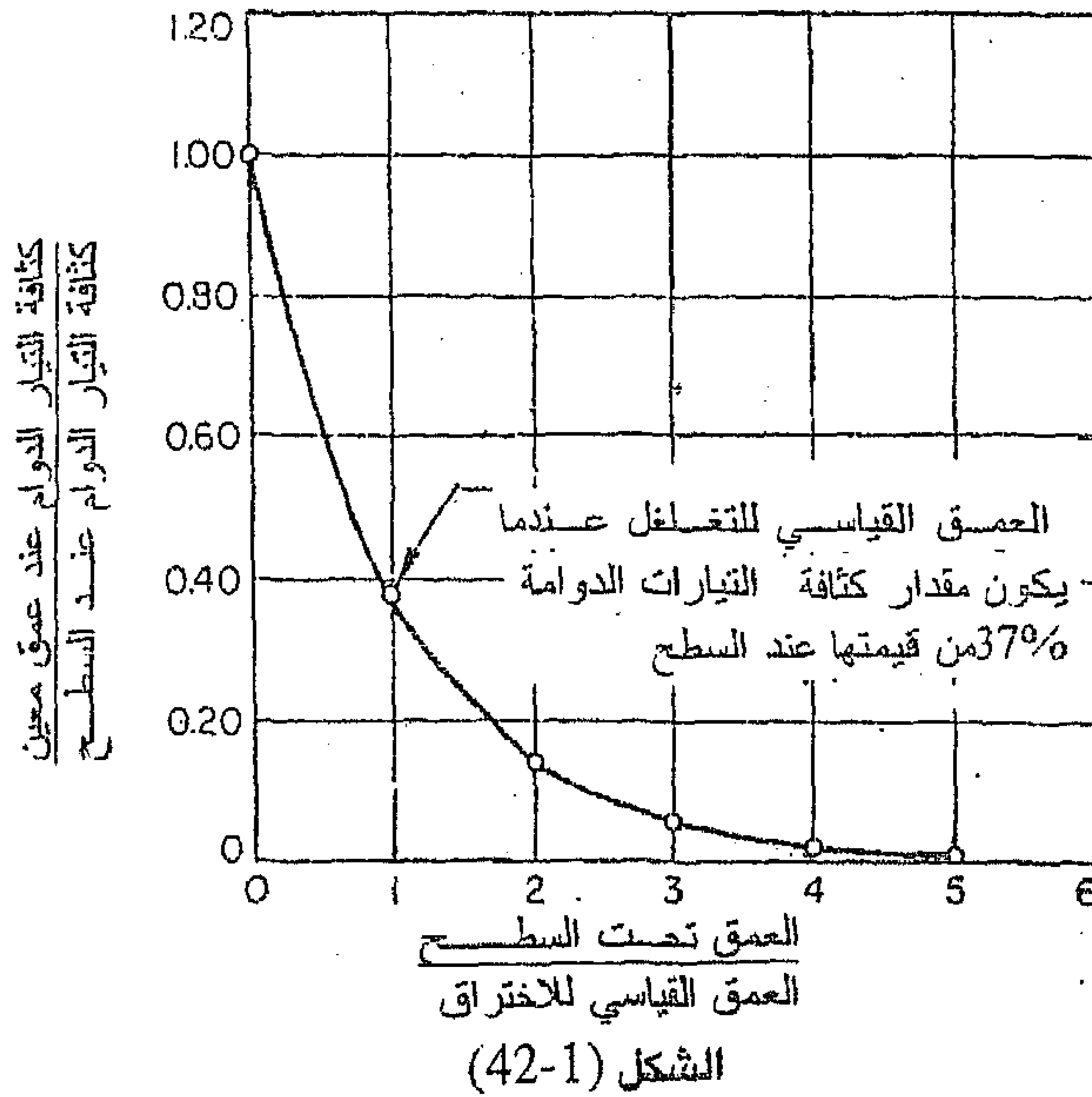
يؤثر شكل وسمك الجزء المفحوص نفسه على الإستجابة للتيارات الدوامة، إضافة الى العلاقة الهندسية الموجودة بين ملف الفحص و الجزء. لايكون توزيع التيارات الدوامه منتظماً خلال الجزء المراد فحصه ، حيث أنها تكون اكثر كثافة عند السطح تحت الملف مباشرةً، وتقل كثافتها كلما ابتعدنا عن السطح وتعرف هذه الظاهرة «بتأثير الجلد» (Skin effect) . تكون كثافة التيارات الدوامة صفراً عند مسافة معينة من سطح الجزء السميك.

يبين الشكل (1-42) كيفية تغيّر التيارات الدوامة كدالة مع البعد عن السطح. ويُعرف العمق الذي تنخفض فيه كثافة التيارات الدوامة الى حوالي 37% من كثافتها عند السطح « بالعمق القياسي للاختراق (standard depth of penetration) . يعتمد هذا العمق على التوصيلية الكهربائية والمنفذية المغناطيسية للمادة وعلى تردد التيار المغنط. فيقل عمق الاختراق مع زيادة التوصيلية والمنفذية او تردد التيار عند الفحص. يمكن حساب العمق القياسي للإختراق من المعادلة الآتية:

$$S = 4950\sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(8\text{-}1)$$

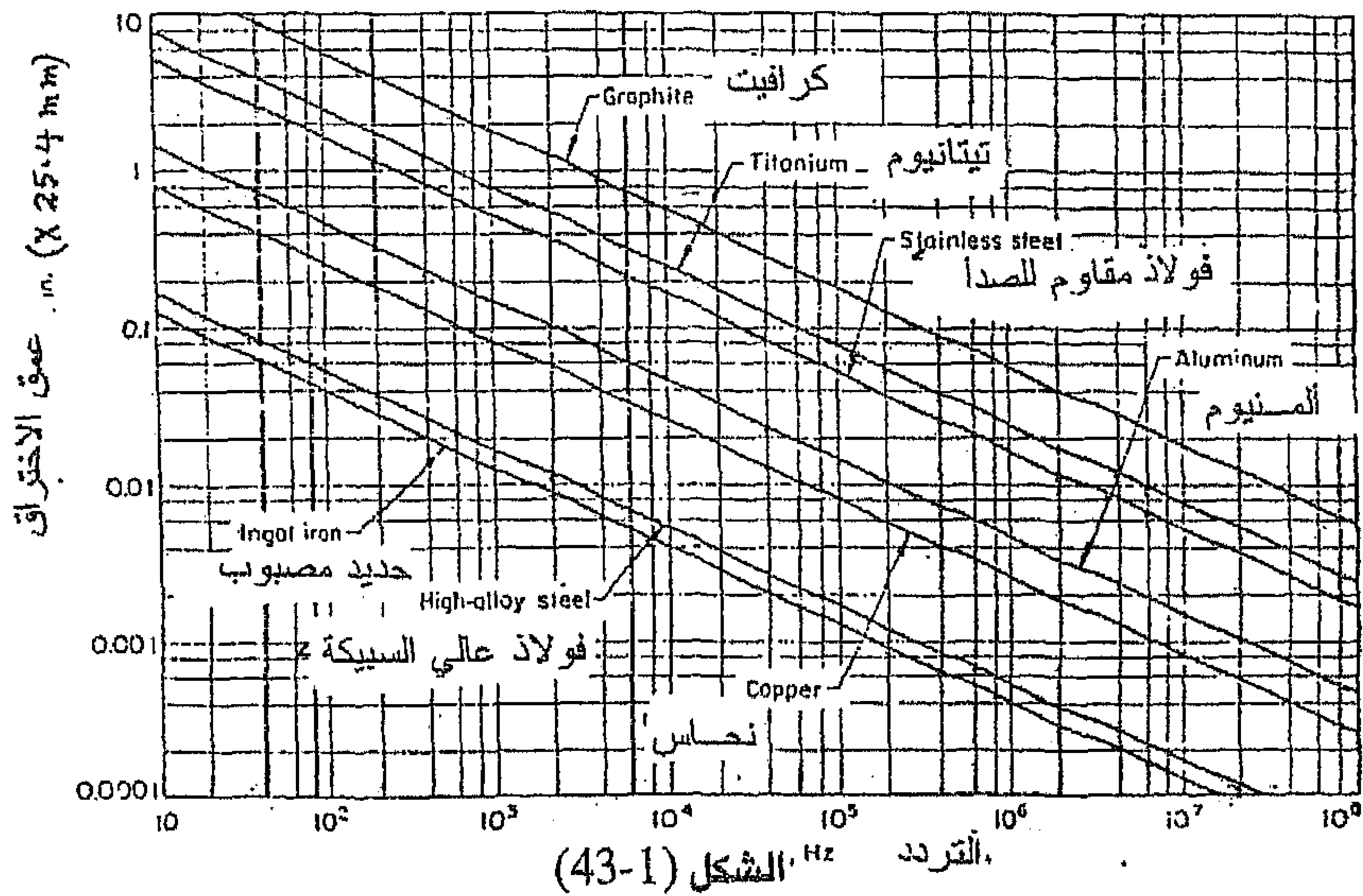
S هو العمق القياسي للإختراق (بالسنتمتر)، ρ المقاومية ( أوم – سنتمتر) و μ المنفذية المغناطيسية (μ = 1 للمواد غير المغناطيسية) و f هو التردد المستخدم في الفحص (بالهيرتز Hz). يبين الشكل (1-43) العمق القياسي للإختراق كدالة للتردد المستخدم في الفحص بالتيارات الدوامه لمواد مختلفة التوصيلية الكهربائية.

إذا كان سمك المادة المراد فحصها أقل من العمق القياسي للإختراق فإن استجابة التيار الدوام ستعكس سمك المادة . فيكون من الضروري اذن التأكد من أن سمك المادة إما أن يكون ثابتاً او أكبر من العمق الذي يمكن للتيارات الدوامة اختراقه بالكامل. ويجب التذكر ان التيارات الدوامة لا تقف عند العمق القياسي للإختراق وانما تستمر الى مابعد تلك المسافة بقليل. يجب أن يكون سمك الجزء المراد فحصه ضعفين او ثلاثة أضعاف العمق القياسي للإختراق عادةً لأجل ان لايكون للسمك




الشكل (1-42)

**تغيّر كثافة التيارات الدوامة مع العمق تحت السطح لجسم موصل – يدعى هذا التغيير «بتأثير الجلد» اصطلاحاً.**




الشكل (1-43)

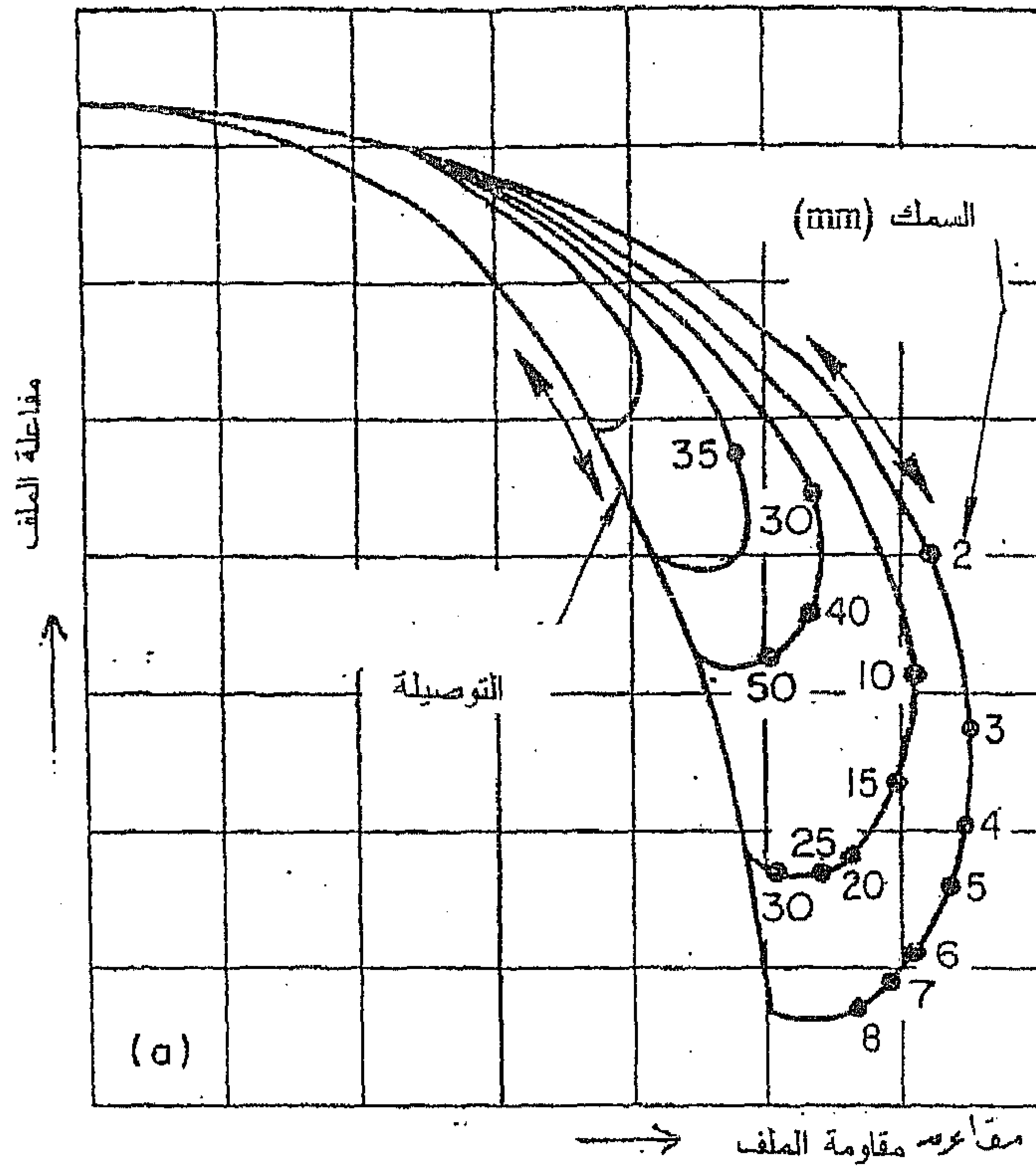
**تغيّر العمق القياسي للتغلغل مع تردد التيارات الدوامة المستخدم في الفحص، والمعادن مختلفة التوصيلية الكهربائية.**

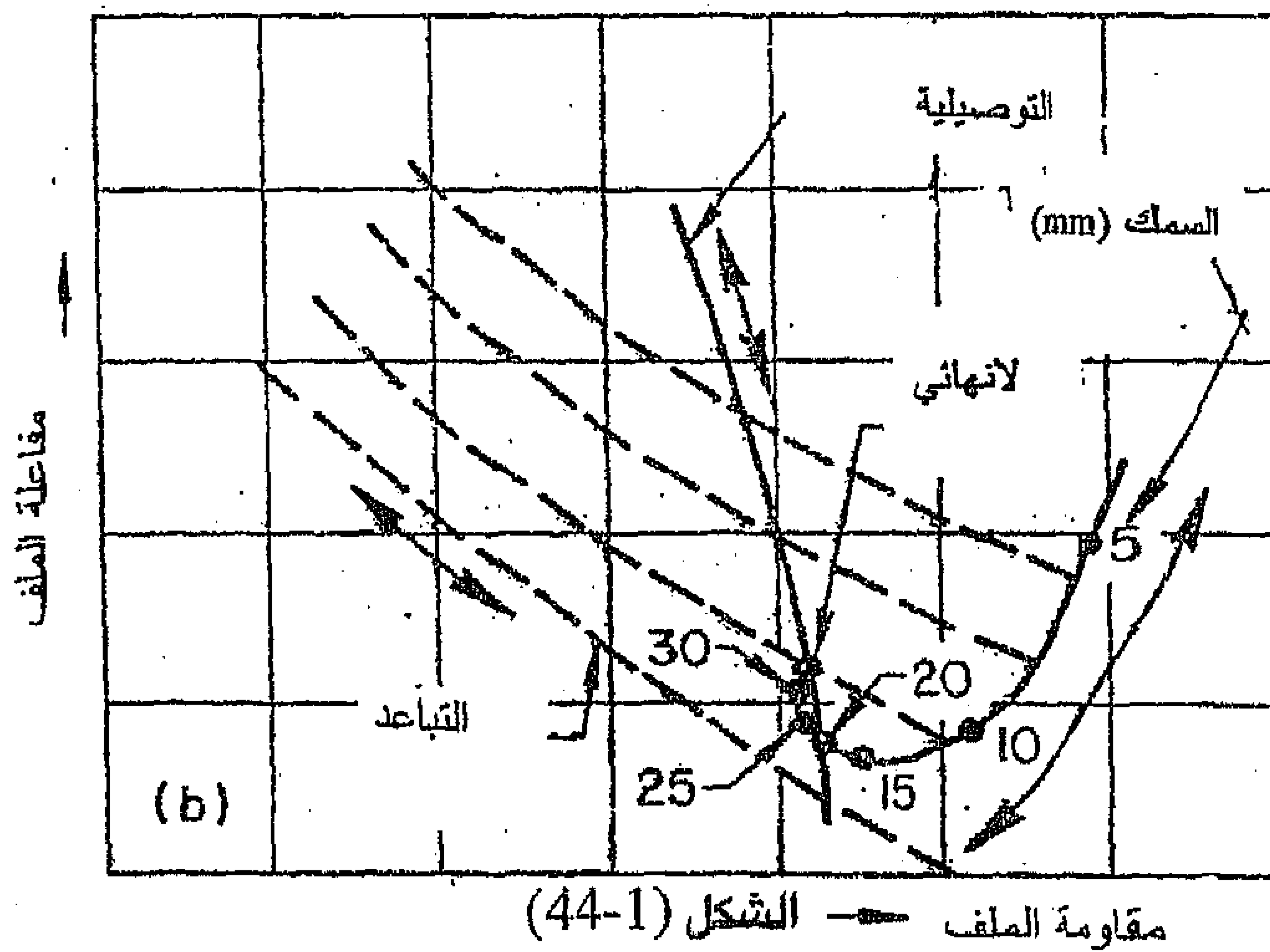
تأثيراً على استجابة التيار الدوام. ومن الممكن معايرة جهاز الفحص بالتيار الدوام لقياس سمك المادة لما له من تأثير مختلف على استجابة التيارات الدوامة. يتبع التغيير في سمك المادة المنحنيات في مستوى الممانعة كتلك الموجودة في شكل (1-44) . فكما يظهر من المنحنيات تكون قياسات السمك بطريقة التيارات الدوامة أكثر دقة في المواد الرقيقة (الشكل 1-44b) مما هي عليه في المادة السميكة (الشكل 1-44a). والعكس صحيح عند قياس السمك بوساطة الأمواج فوق السمعية، ولذلك تكمّل كلا الطريقتين احداهما الآخرى.

**ترددات الفحص:**

يستخدم مدى من الترددات يتراوح بين 200 هيرتز الى 6 ميكاهيرتز أو أكثر في تقنية الفحص بالتيارات الدوامة. يتم فحص اغلب المواد غير المغناطيسية عند ترددات بحدود بضعة آلاف هيرتز (Hertz). تستعمل ترددات واطئة، بصورة عامة، ، ابتداءاً من حوالي 1 كيلو هيرتز لفحص المواد المغناطيسية. مع أن التردد المستخدم واقعاً يعتمد على سمك الجزء المراد فحصه وعمق الاختراق المرغوب ودرجة الحساسية او قدرة التمييز (resolution) المطلوبة والهدف من الفحص.

يكون تردد الفحص عادةً حالة متوسطة، فيراعى في ذلك ظروف الفحص، على سبيل المثال ، يجب ان يكون الاختراق كافياً للوصول الى أي عيوب قريبة من السطح (تحت السطحية) ومن ثم يمكن كشفها. وبالرغم من ان مقدار الاختراق يزداد بنقصان التردد فهذا لايعني انه يجب استخدام الترددات الواطئة لأن الحساسية على كشف العيوب سوف تنخفض الى حد ما كما تقل سرعة الفحص، اذن يجب أن يكون تردد الفحص منسجماً مع عمق الاختراق المطلوب. وتنشأ المشكلةعند فحص العيوب التي هي تحت السطح والى عمق معين ففي هذه الحالة تستخدم ترددات واطئة ويكون ذلك على حساب الحساسية اي أنه لايمكن كشف العيوب الصغيرة. تستخدم الترددات الواطئة نسبياً عند فحص المواد المغناطيسية نظراً للإختراق القليل في هذه المواد. ويمكن الرجوع الى المصادر المختصة في اختيار التردد الملائم وحسب مواصفات المادة المراد فحصها.




الشكل (1-44)

**مخططات نموذجية للمانعة المستوية لمادة متغيرة السمك (a) مخطط لمادة سميكة (b) مخطط لمادة خفيفة على تدريج موسع. مقدار تردد الفحص كان 100k Hz.**

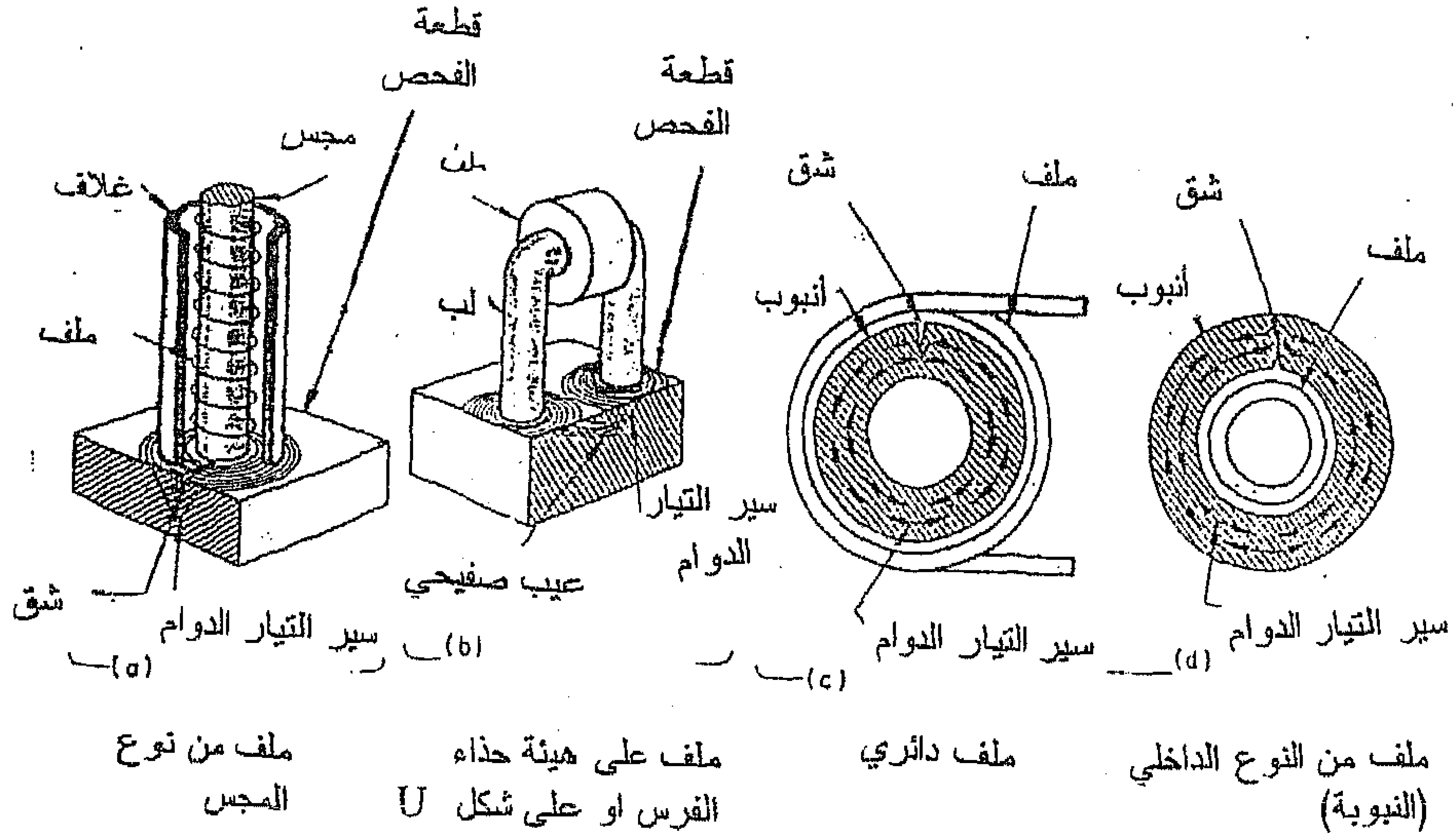
## ملفات الفحص:

ان ملف الفحص جزء أساسي في أي منظومة فحص بالتيارات الدوامة. يعتمد شكل ملف الفحص الى حدٍ كبير على الغرض من الفحص وعلى شكل الجزء المراد فحصه . فعند الفحص عن عيوب كالشقوق والثنيات فمن الضروري ان يكون مسار التيارات الدوامه عمودياً تقريباً على العيوب مهما أمكن لأجل الحصول على أعظم استجابة منها. ولايحدث اي تشويه او قد يحدث قليل من التشويه للتيارات إذا كان مسار التيارات الدوامه موازيه للعيوب وعليه سيحدث رد فعل قليل جداً على ملف الفحص.

## الملفات المحيطة وملفات المجسات:

تبقى نوعاً الملفات المحيطة وملفات المجسات هي الأكثر استخداماً في فحص التيارات الدوامة من بين العديد من أنواع الملفات المستخدمة. يتم في العادة استعمال ملف المجس في فحص الشقوق السطحية لأن هذا النوع من الملفات يستحث تيارات مسارها موازي للسطح ومن ثم تقطع الشقوق كما في شكل (45a-1) . في حين ان ملفات المجسات غير ملائمة للكشف عن العيوب الصفائحية. يستخدم للعيوب الصفائحية ملف على شكل حذاء الفرس كما في شكل (45b-1).

يتم استخدام الملفات المحيطية بشكل عام لفحص الأنابيب والقضبان (الشكل 45c-1) وذلك لملائمة شكل الأجزاء والسرعة العالية لهذا النوع من الملفات، إلا أن هذا النوع من الملفات ملائم فقط للعيوب الموازية لمحور الجزء . ان أغلب العيوب الموجودة في مثل هذه الأجزاء والمتولدة أثناء عمليات تصنيعها موازية للمحور. أما إذا أريد فحص عيوب غير موازية للمحور فيستخدم ملف المجس لذلك. وللكشف عن العيوب في السطوح الداخلية للأنابيب فيستخدم ملف داخلي كما في شكل (45d-1).




شكل (1-45)

**أنواع وتطبيقات الملفات المستخدمة في فحص التيارات الدوامة.**

**a– ملف من نوع المجس يستخدم للألواح المسطحة للكشف عن الشقوق.**

**b– ملف على هيئة حذاء الفرس (اي شكل U) يستخدم مع الألواح المسطحة للكشف عن العيوب الصفيحية.**

**c – ملف دائري يستخدم لفحص الأنابيب.**

**d – ملف داخلي (نوع النبوبة) يستخدم لفحص الأنابيب.**

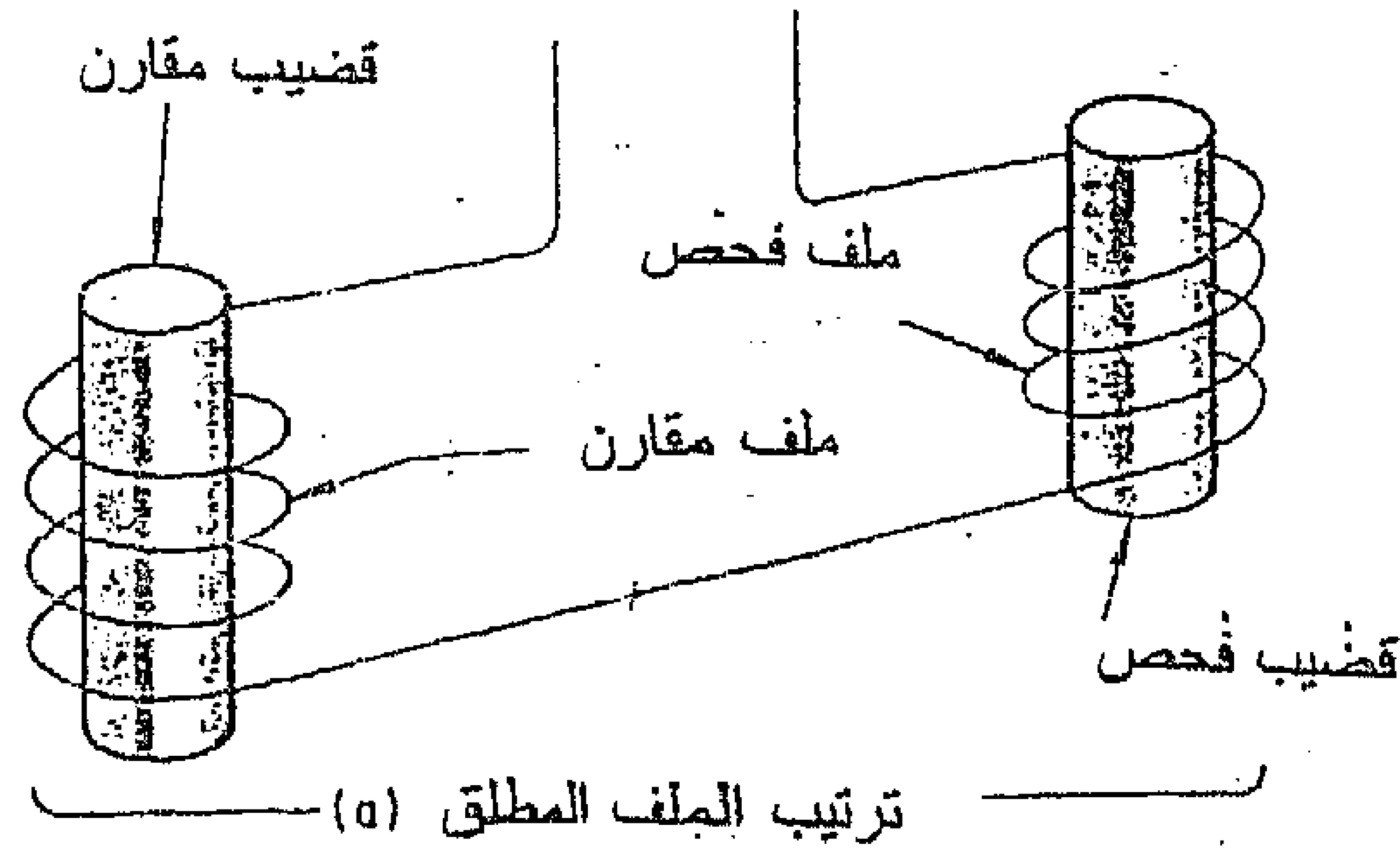
**الملفات المتعددة:**

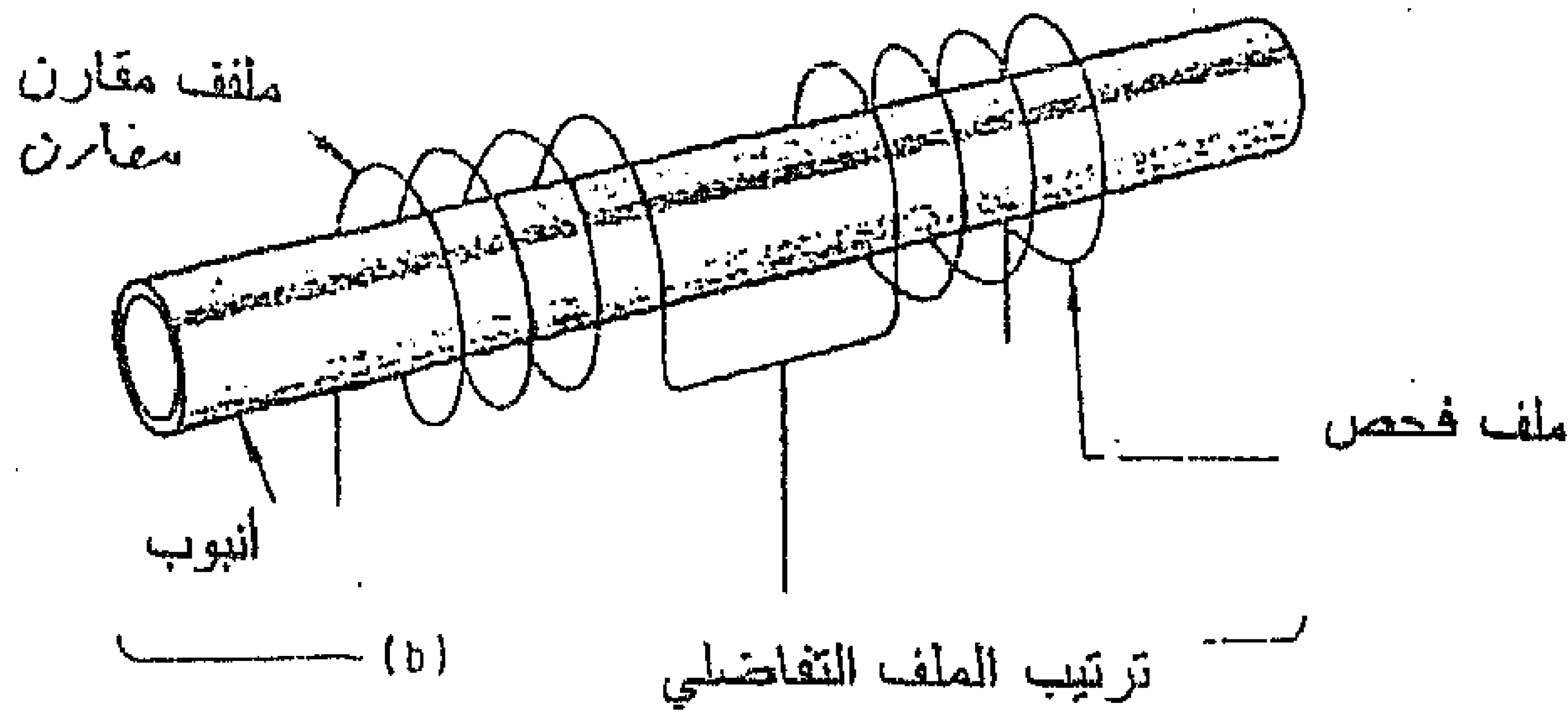
تستخدم في العديد من فحوصات التيارات الدوامه ملفين مربوطين على التوالي بشكل متخالف بحيث أنه عندما تكون ممانعتا هما متساوية لا ينتج اي حاصل من هذا الإزدواج. ويمكن استخدام زوج الملفات اما بالشكل المطلق او بالشكل التفاضلي كما في الشكل (1-46). ففي الحالة المطلقة يوضح نموذج مقبول (مستوفى للشروط اي خالي من العيوب) في أحد الملفين ويستخدم الآخر للفحص. وهنا تتم معايرة الجزء المراد فحصه مع الجزء القياسي (المقبول) ويتم التحسس بالفرق بينهما، إن وجد، بوساطة جهاز ملائم. تستخدم هذه التقنية في التفريق او الفصل بين المواد.

ومن الممكن استخدام الربط التفاضلي (الشكل 1-46b) عندما يراد التحسس بالفروق في قطر الأنبوب. فعندما تكون مقاطع الأنبوب متساوية فلا يكون هناك اي حاصل نهائى (out put) أما إذا كان هناك فرق بين مقطعي الأنبوب عند منطقة كل من الملفين فيمكن ملاحظة الإشارة وكذلك الحال عندما يوجد عيب في منطقة احد الملفين،

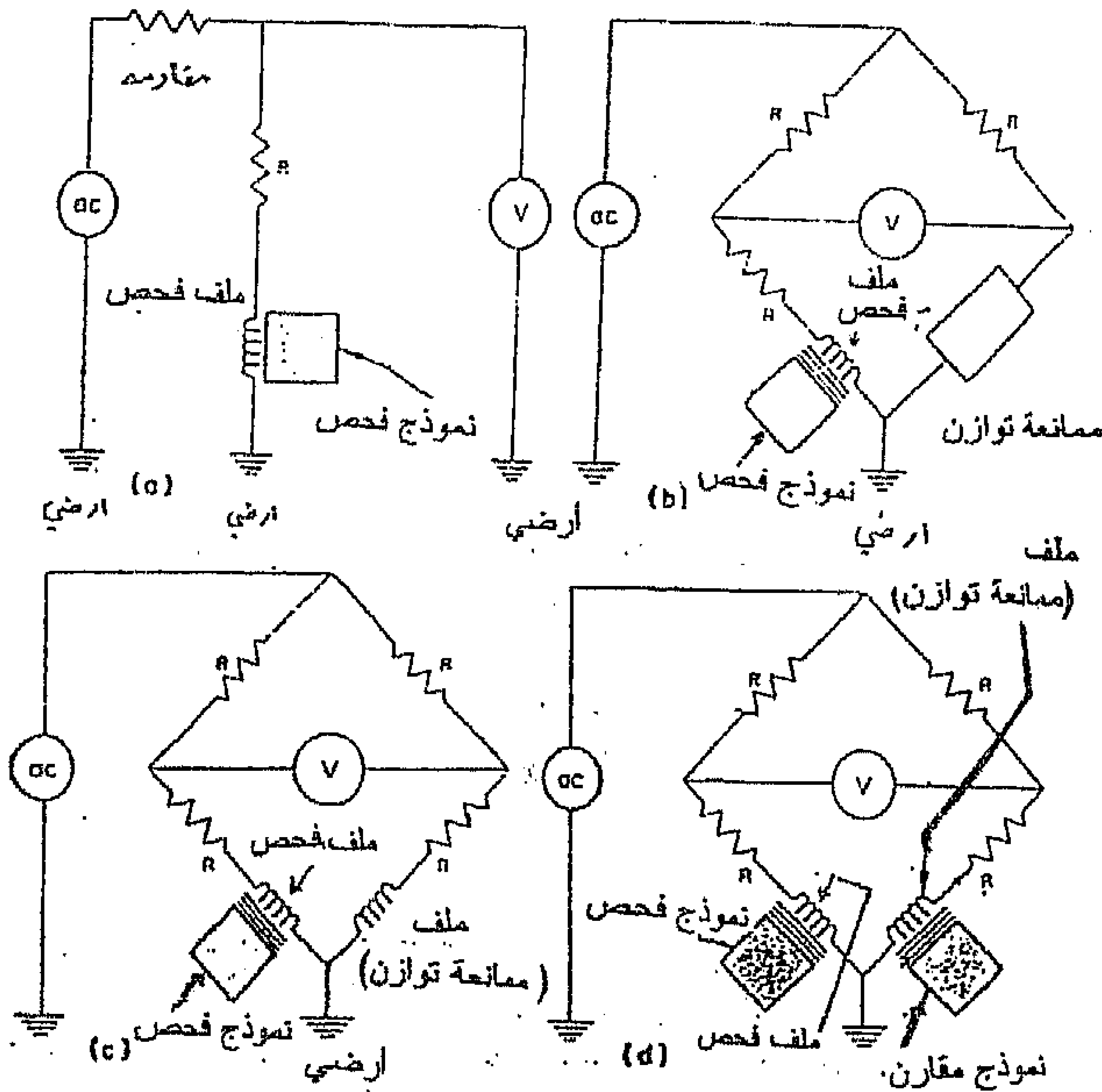
**اجهزة التيارات الدوامة:**

يبين الشكل (1-47a) مخطط لجهاز فحص بسيط بالتيارات الدوامة والذي تراقب فيه الفولتيه على طرفي ملف الفحص. وهذه الدائرة ملائمة لقياس تغييرات تباعد كبيره، إذا كانت الدقة غير مهمة جداً. اما الدائرة المبينة في الشكل (1-47b) فمصممة لدقة أكبر. وهذا الجهاز يتألف من مصدر منفرد وقنطرة ممانعة مع مقاومات اسقاطية وملف فحص في أحد أذرع القنطرة وممانعه معادلة في الذراع الأخرى. يقاس الفرق في الفولتيه بين ذراعي القنطرة بفولتيميتر التيار المتناوب. وكبديل فالممانعة المعادلة في الذراع المقابل لملف الفحص يمكن ان تكون ملف مشابه لملف الفحص كما في الشكل (1-47c) وقد يكون هناك نموذج أساس (قياسي) في الملف (الشكل 1-47d). ففي الحالة الأخيرة إذا كانت كل أجزاء القنطرة متناظره فتحدث الإشارة فقط عندما تحيد ممانعة ملف الفحص عن تلك التي لملف النموذج الأساس.



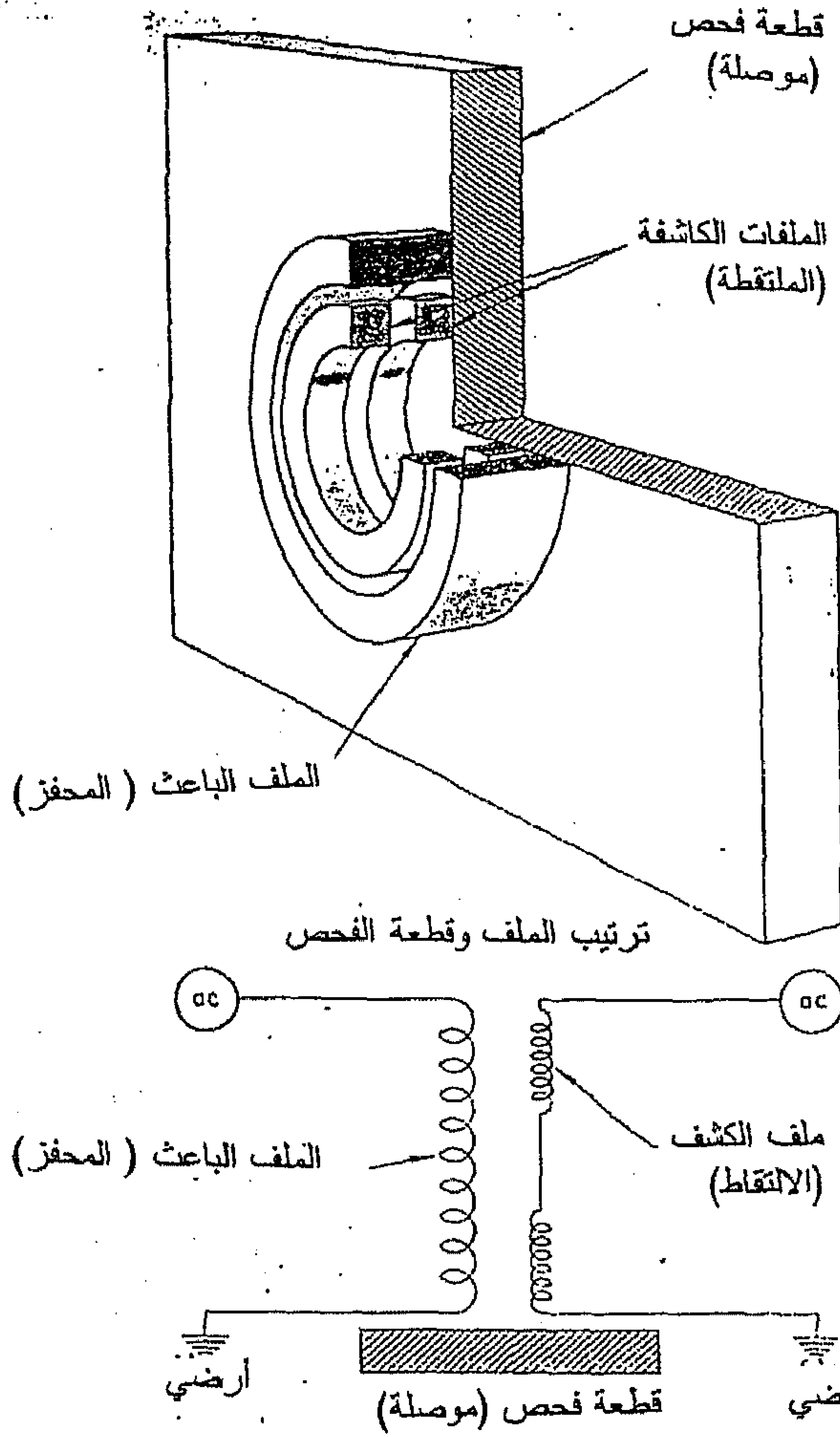




شكل(1-46)
الترتيبات المطلق والتفاضلي للملفين المضاعفين المستخدمين في الفحص بالتيارات الدوامة




شكل (1-47)
أربعة أنواع من أجهزة الفحص بالتيارات الدوامة (a) ترتيب بسيط وفيه تتم السيطرة على الفولتيه على طرفي الملف (b) قنطره ممانعه نموذجية (c) قنطره ممانعة بزوج من الملفات (d) قنطرة ممانعة بزوج من الملفات ونموذج قياس (مقارن) في الملف الثاني

يوجد نوع آخر من القنطرات المستخدمة في الفحص والتي تنتقل إشارة القدرة فيها بواسطة محول مزدوج الى ملفين أحدهما الملف الأساس والآخر ملف الفحص كما في الشكل (1-48) . أما مبدأ الفحص فمتشابه في كل أجهزة الفحص تقريباً وكما تم شرحه سابقاً.




**الشكل (1-48)**

**مجس قنطرة حث في مكانٍ على سطح القطعة المراد فحصها.**

**رسم تخطيطي يبين كيفية التحويل المزدوج للإشارة عالية الطاقة من الملف الباعث الى ملفي الكشف (ملف الفحص في الأسفل والملف القياسي في الأعلى).**

## ٦-٤-١ الفحص بالأمواج فوق السمعية:

**المقدمة:**

الأمواج الصوتية هي ذبذبات ميكانيكية تتضمن حركة دقائق الوسط الذي تنتقل فيه . فتتذبذب دقائق الوسط مسببةً تشويهه حيث تنتقل الطاقة من دقيقة (جسيمة) الى أخرى على طول طريق الموجه. ولهذا لايمكن للصوت الإنتقال في الفراغ . ينتقل الصوت في المواد بصوره مختلفة تبعاً لطبيعة وخواص المادة. للذبذبات بطبيعتها تردد، وهو عدد الذبذبات التي تحصل بالثانية الواحدة ووحداته هي ذبذبة بالثانية او هيرتز (Hertz) ومضاعفاتها حسب الوحدات العالمية حيث أن 1 هيرتز (Hz) يعني ذبذبة واحدة في الثانية.

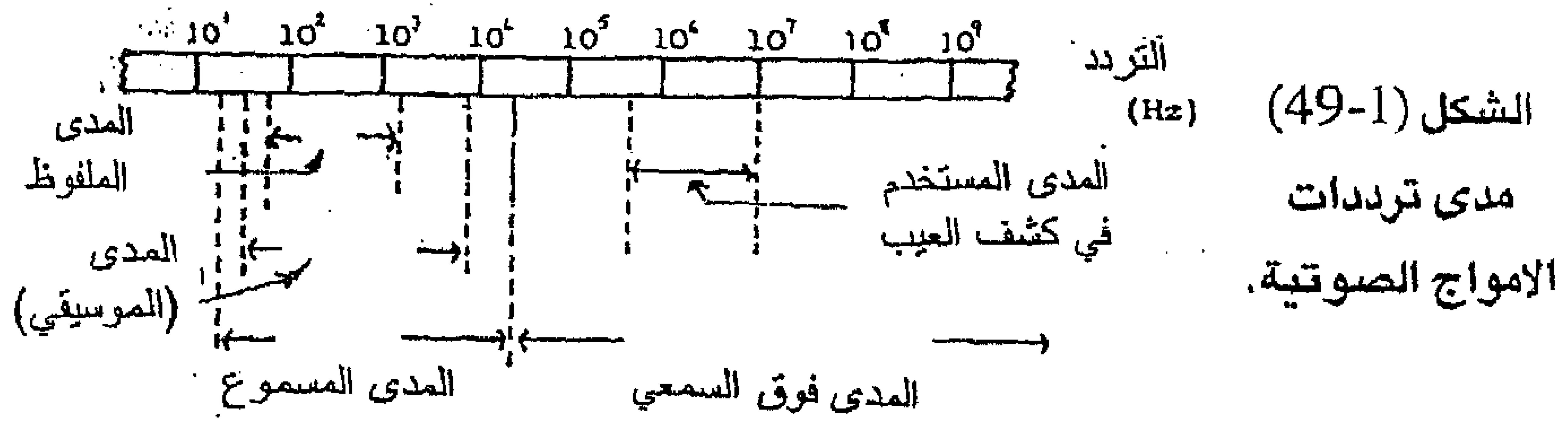
لقد تم استخدام الأمواج الصوتية منذ امدٍ بعيد لفحص جودة او سلامة المواد وكمالها (عدم وجود عيب فيها). فقد استعملت هذه الأمواج ، على سبيل المثال، لفحص سلامة عجلات عربات السكك الحديدية وذلك بنقرها وسماع الصوت المتولد منها، ومن ثم يمكن التمييز بين ماهو معاب وما هو سالم منها. تعتبر تقنية فحص العيوب بالذبذبات فوق السمعية هي ببساطة امتداد وتفنن في هذه التقنية.

ويقل سماع الموجات الصوتية كلما ازداد ترددها حتى تصل الى حدٍ لايمكن للأذن البشرية التحسس بها وتسمى عندئذٍ ذبذبات او أمواج فوق سمعية.

للأمواج الصوتية طيف من الترددات وكل نوع له مدى تردد خاص به بشكل يشابه تقريباً الأمواج الكهرومغناطيسية من هذه الناحية فقط. يبين الشكل (1-49) مدى تردد (frequency) الأمواج الصوتية التي من ضمنها الأمواج فوق السمعية.

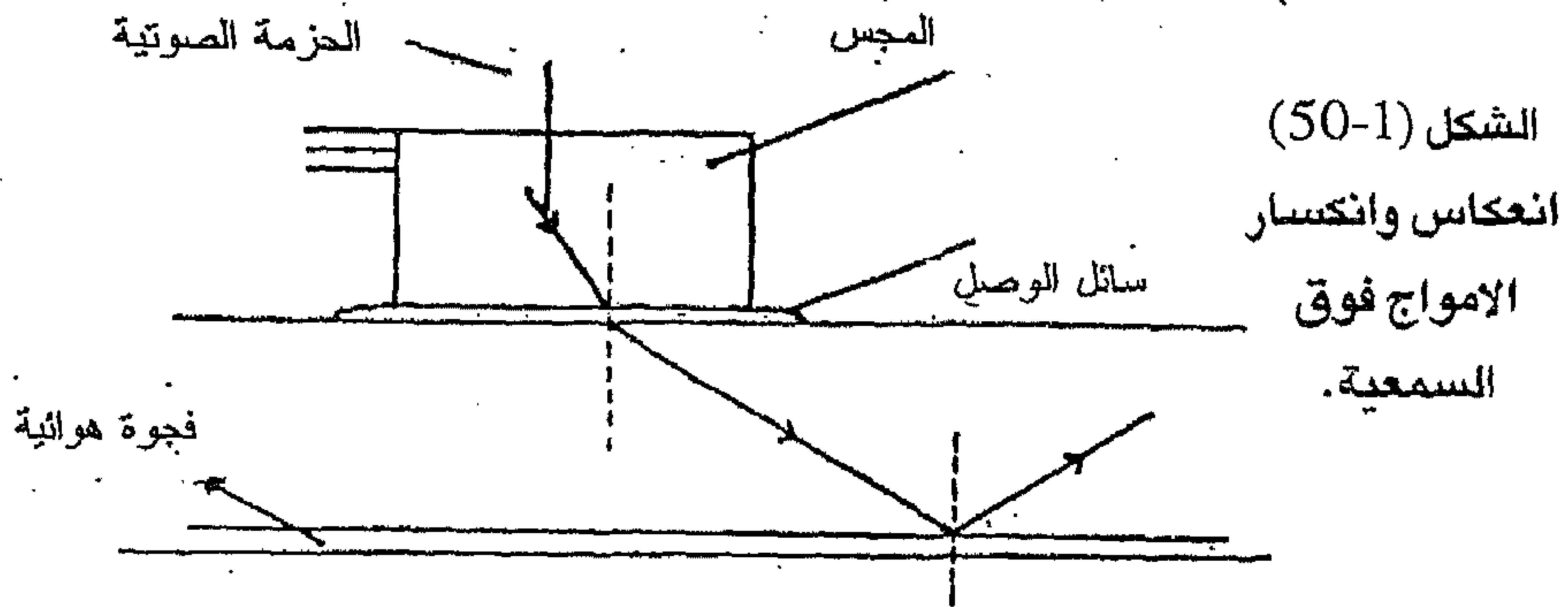
يتضمن المدى الكامل لتردد الصوت كلاً من المدى تحت السمعي (infrasonic) الذي يكون تردده أقل من 16 هيرتز والمدى السمعي الذي تردده بين 16

هيرتز و 20 كيلو هيرتز (الذي يكون مسموعاً من قبل الأذن البشرية) والمدى فوق السمعي الذي تردده من 20 كيلو هيرتز حتى 1000 ميكاهيرتز أو أكثر. ان الترددات المستخدمة في تقنية الفحص بالأمواج فوق المسمعية هي في حدود 0.5 الى 20 ميكاهيرتز تقريباً.




الشكل (1-49) مدى ترددات الامواج الصوتية.

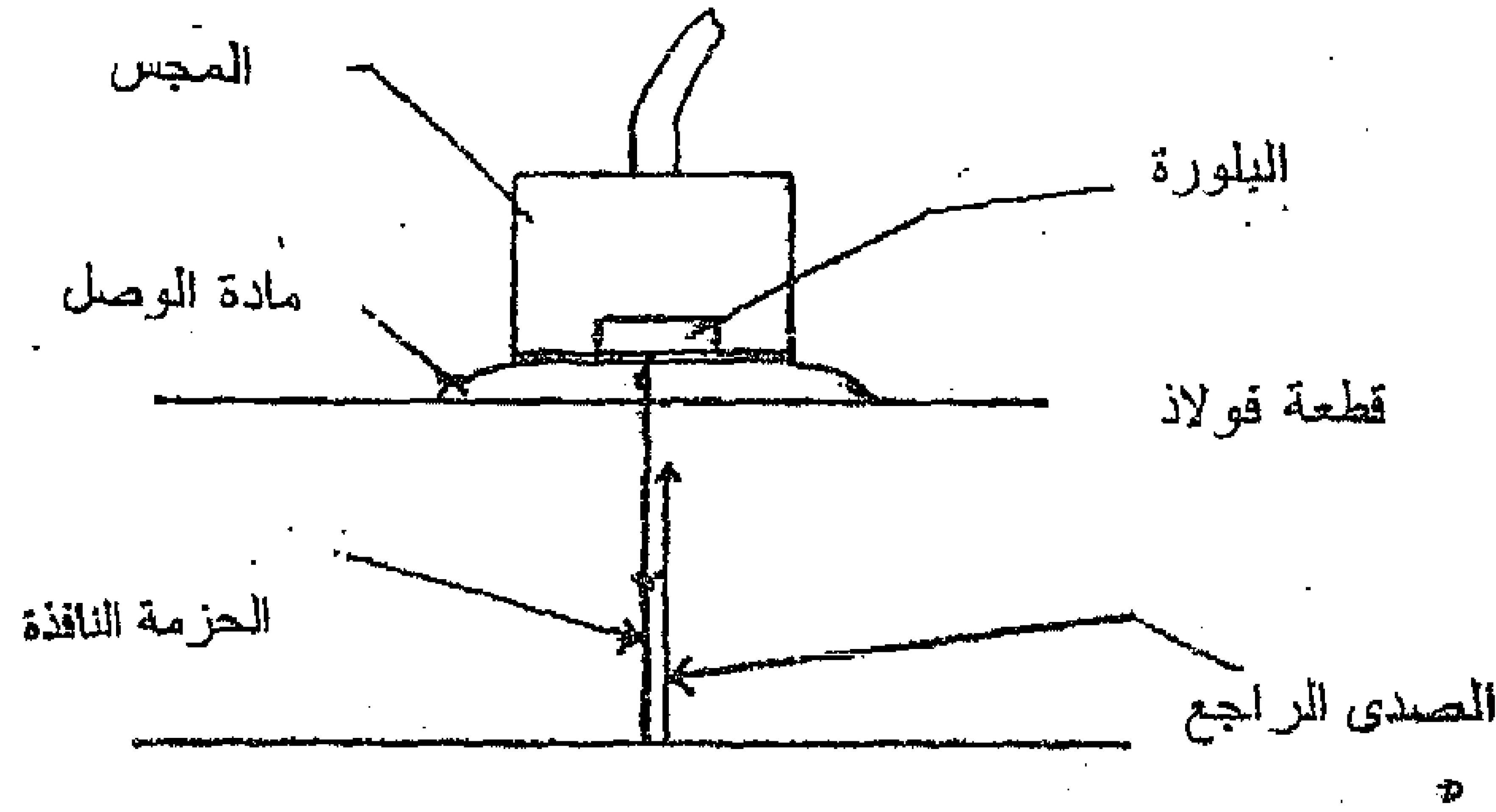
ومن الجدير بالذكر ان للأمواج فوق السمعية خاصية مهمة بالنسبة الى الفحص اللا اتلافي وهي أنها يمكن ان تنتقل خلال الأجسام الصلبة، شأنها في ذلك شأن بقية الأمواج الصوتية . كما أنها تخضع لنفس القوانين الفيزياوية التي تخضع لها الأمواج الأخرى كالإنعكاس والإنكسار وغيرها ، كما يبدو من الشكل (1-50) . فعلى سبيل المثال، عند انتقال الصوت من وسط الى آخر فإنه سوف ينكسر (أي أن اتجاه سيره يتغير قليلاً).




الشكل (1-50) انعكاس وانكسار الامواج فوق السمعية.

يمكن أن ينعكس الصوت، كما في حالة الضوء، عندما يصل الى او يصطدم بمنطقة تتغير فيها خواص المادة. فعند وصول الصوت المنتقل في قطعة من الفولاذ

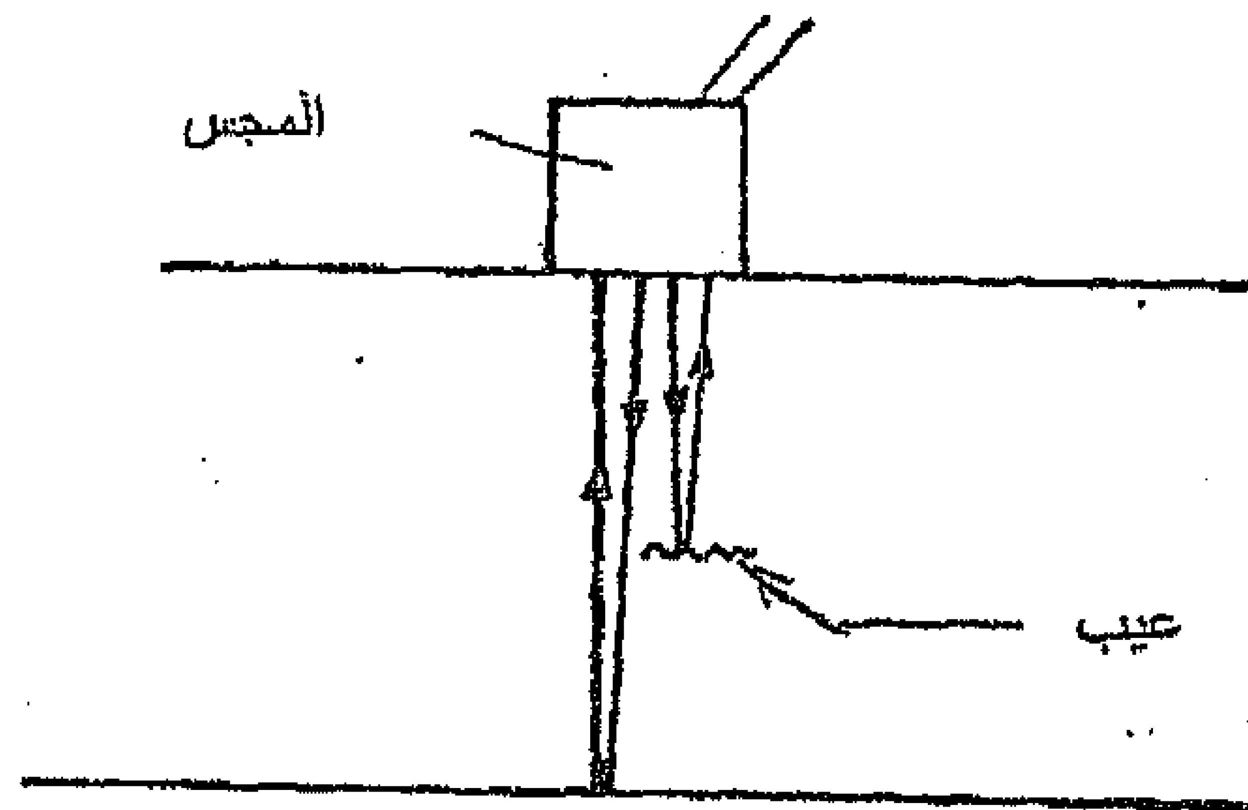
الى سطحها الثاني فينعكس اغلبه راجعاً (حسب قوانين الانعكاس) بدلاً من ان يستمر بسيره وينفذ الى الهواء، الشكل (1-51).




**الشكل (1-51)**
**تنعكس اغلب الحزمة الصوتية عند وصولها الى سطح بين وسطين (كالفولاذ والهواء).**

ولو فرض ان هناك شقاً في داخل الفولاذ (أي عدم استمرارية في المعدن (discontinuity) او اكتنافات (inclusions) (مثل قطعة صغيرة محصوره من الخبث) فعند وصول الموجه الصوتية الى هذه العيوب فسوف تنعكس ايضاً.

تزودنا هذه الخاصية بأساس طريقة كشف العيوب لا أتلافياً، الشكل (1-52).




**الشكل (1-52)**
**اساس طريقة الفحص بالأمواج فوق السمعية بتقنية الإنعكاس (الصدى)، حيث يحدث الانعكاس عن العيب كما يحدث عن السطح الخلفي للقطعة.**

يجب ان تتم إمالة (توجيه) الموجه الصوتية بحيث أن أكبر مقطع عرضي للعيب يكون عمودياً على الموجه وذلك لأجل التحسس الأمثل للعيب.

توجد بعض المتطلبات لنجاح هذه التقنية وهي:

١- مادة (وسط) تسمح بمرور الصوت من مصدر تكوينه الى الجسم المراد فحصه.

٢- عدم اعاقة سير الموجه بسبب الانعكاسات، على سبيل المثال، والناتجة من طبيعة بنية المادة المفحوصة (كقشور الكرافيت في حديد الزهر) ومن ثم وصولها الى العيوب المراد الكشف عنها عند وجودها في النموذج.

٣- معرفة اتجاه العيوب او امكانية مسح العيوب من كل الزوايا والإتجاهات.

٤- امكانية وصول الحزمة الصوتية لكل مساحات القطعة المراد فحصها. ويعني هذا ان الشكل الهندسي للقطعة المفحوصة مهم جداً.

أما ما هو حجم العيب الممكن كشفه فيعتمد على عدة عوامل. ومن المهم أن يكون التردد المستخدم عند الفحص بالأمواج فوق السمعية اعلى تردد ممكن بالتساوي مع الامكانية باختراق مقطع القطعة المفحوصة عند ذلك التردد وذلك لأجل التحسس بأصغر عيب ممكن.

ولأجل ايضاح هذه النقطة تصور ان بحيرة كبيرة ماءها ساكن، القي في مركزها حجر كبير فإن أمواجاً كبيرة سوف تتولد وبطول موجي كبير ($\lambda$) (المسافة بين قمتين متجاورتين في الموجه) والتي سوف تنتشر مبتعدة عن نقطة القاء الحجر (المركز) والى مسافة كبيرة لأنها ذات طاقة عالية ولكن بتردد منخفض مسبباً.

فإذا صادفت الأمواج الكبيرة هذه عائقاً صغيراً في طريقها فإن الإنعكاس سيكون صغيراً وسيضمحل بسرعة. فلو تصورنا ان العائق الصغير يمثل عيب صغير فيتبين من ذلك أن مقدار تحسس هذا العيب بالأمواج ذات الترددات المنخفضة سيكون قليل او منخفض ايضاً.

أما عند القاء حجر صغير في البحيرة فستتولد موجات متقاربة (صغيرة الطول الموجي) أي عالية التردد، ومع ان هذه الأمواج تضمحل قبل ان تصل الى مسافات كبيره فإن العوائق الصغيرة تولّد إشارات (علامات) انعكاس واضحة جداً.

ومن هُنا يُفهم ان الأمواج الصوتية ذات الترددات العالية (الطول الموجي القصير) لها حساسية قليلة (أي مسافة تغلغلها في المادة قليلة) لكن قدرة كشفها للعيوب الصغيرة عالية والعكس صحيح اي أن الأمواج ذات التردد المنخفض (اي طول

موجي كبير) لها حساسية عالية (مسافة تغلغها في المادة كبيرة) لكن قدرة كشفها للعيوب الصغيرة منخفضة.

تكون طبيعة الاهتزازات (الأمواج) فوق السمعية، على النقيض من طبيعة الاهتزازات السمعية، عدم النفوذ بسهولة خلال الغازات ، ومع ذلك فالاهتزازات فوق السمعية تمر بيسر خلال السوائل والأجسام الصلبة وتستطيع ان تقطع مسافات طويلة جداً بشرط ان تكون الأوساط التي تمر بها متجانسة . فالثغرات او السطوح البينيه (خصوصاً مع الهواء) تؤدي الى إنعكاس الذبذبات فوق السمعية بشكل تام تقريباً.

يمكن استخدام الفحص بالأمواج الصوتية باستعمال الترددات السمعية للكشف عن العيوب في الخزفيات والفخاريات (Pottery and ceramics) بوساطة قرعها وكذلك يمكن تحسس العيوب في دواليب عربات السكك الحديدية بوساطة عملية نقر الدولاب (wheel tapping) كما أشرنا الى ذلك سابقاً.

**سرعة الأمواج الصوتية:**

تختلف سرعة الأمواج الصوتية باختلاف الاوساط حيث تعتمد على خواصها الفيزياوية والميكانيكية.

تقسم الموجات الصوتية الى نوعين:

أ- الأمواج الإنضغاطية او الطولية (Compression or Longitudinal waves)، وهي الامواج التي تكون حركة دقائق الوسط فيها موازية لإتجاه سير الموجه. كما هو الحال عندما يهتز نابض حلزوني محمّل فتكون حركة الحلقات ، صعوداً ونزولاً موازية لإتجاه تقدم الموجه.

ب- الأمواج القصية او المستعرضة (Shear or transvere waves) وهي الأمواج التي تكون فيها حركة دقائق الوسط عمودية على اتجاه سير الموجه. كما هو الحال عند القاء حجر في بركة ماءٍ ساكنة فتكون حركة جزيئات الماء، أو أية دقائق طافية عليه، صعوداً ونزولاً عمودية على اتجاه تقدم الموجه.

يمكن أن يعبر عن سرعة الأمواج الطولية (Vc) في السوائل بالآتي:

$$V_c=\left(\frac{K}{\rho}\right)^{1/2} \qquad (9\text{-}1)$$

حيث تمثل K الانضغاطية و ρ الكثافة. أما في المواد الصلبة فيمكن اعطاء السرعة بالعلاقة التالية:

$$V_c=\left(\frac{E(1-\upsilon)}{\rho\,(1+\upsilon)(1-2\upsilon)}\right)^{1/2} \qquad (10\text{-}1)$$

حيث أن E معيار المرونة و $\upsilon$ نسبة بويزن.

يبين الجدول (1-14) مقادير سرع الموجات الطويلة في عدد من المواد المألوفة.

جدول (1-14) سرع الموجات الطولية الصوتية في بعض المواد

| الوسط او المادة | السرعة ($V_c$) متر/ ثا |
|---|---|
| الهواء* | 330 |
| الماء | 1430 |
| الزيت | 1740 |
| الألمنيوم | 6190 |
| النحاس | 4600 |
| المغنيسيوم | 5770 |
| الفولاذ | 5810 |
| البيرسبكس Perspex | 2730 |
| البولي اثلين | 2340 |

* عند الضغط الجوي وعند درجة حرارة 15°م.

أما سرعة الأمواج القصية (Vs) في الأجسام الصلبة فهي نصف مقدار سرعة الأمواج الطولية على وجه التقريب، وهي تعطى بالعلاقة التالية:

$$Vs = \left(\frac{G}{\rho}\right)^{1/2} \quad \text{.....................(11-1)}$$

حيث تمثل G معيار الجسوء للمادة.

**الطول الموجي :**

يتعلق الطول الموجي ($\lambda$) بالتردد (f) وسرعة الموجه V كالآتي :

$$V = \lambda f \quad \text{.......................(12-1)}$$

والجدول (1-15) يعطي الأطوال الموجية للصوت عند عدد من الترددات ولمختلف المواد.

وعلى غرار الأنواع الأخرى من الأمواج، تنعكس الأمواج الصوتية بصوره مؤثرة فقط عند اصطدامها بأجسام أبعادها مساوية أوأكبر من الطول الموجي للموجه الساقطة ، ولذا يكون واضحاً من الجدول (1-15) ان حزمة الأمواج فوق السمعية التي لها تردد 10 ميكا هيرتز ، على سبيل المثال، ستكون قادرة على كشف العيوب التي قياسها اكبر من 0.58 ملم في الفولاذ، لكنه يمكن تحسس العيوب الأكبر من 4.65 ملم عند استخدام تردد مقداره 1.25 ميكاهيرتز.

جدول (1-15) الأطوال الموجية للموجات الطولية (الانضغاطية) للصوت لمختلف المواد.

| المادة | الطول الموجي ($\lambda$)(ملم) لعدد من الترددات (f) f= 1.25 MHz | 2.5 MHz | 5 MHz | 10.0 MHz |
|---|---|---|---|---|
| هواء | 0.26 | 0.13 | 0.066 | 0.033 |
| ماء | 1.14 | 0.57 | 0.286 | 0.143 |
| زيت | 1.39 | 0.70 | 0.35 | 0.175 |
| ألمنيوم | 4.95 | 2.48 | 1.24 | 0.62 |
| نحاس | 3.68 | 1.84 | 0.92 | 0.46 |
| مغنيسيوم | 4.62 | 2.31 | 1.16 | 0.58 |
| فولاذ | 4.65 | 2.32 | 1.16 | 0.58 |
| بيرسبكس | 2.18 | 1.09 | 0.55 | - |
| بولي أثلين | 1.87 | 0.94 | 0.47 | - |

## انعكاس الأمواج الصوتية ونفوذها:

هناك محدوديات لعبور الموجات الصوتية بين وسطين مختلفين من حيث خواص المرونة. فعند وصول حزمة من الأمواج الصوتية الطولية الى الحد الفاصل بين وسطين فإن جزءاً من الأمواج الساقطة سوف ينعكس عند الحد الفاصل والجزء الآخرمنها سوف ينفذ الى الوسط الثاني عبر الحد الفاصل.فإذا سقطت الأمواج على الحد الفاصل بصوره عمودية فإن الجزء النافذ عبر هذا الحد يكون من نوع الأمواج الطولية (الانضغاطية). يمكن تعيين معامل الانعكاس (R) ومعامل النفوذ (T) من الممانعة الصوتية (acoustic impedance)لكلا الوسطين $Z_1$ و $Z_2$ اللذين مرّت بهما الحزمة . يمكن التعبير عن الممانعة الصوتية لأي مادة بالآتي:

$$Z = \rho\, Vc \qquad \text{.................}(13\text{-}1)$$

حيث تمثل ρكثافة المادة و Vc سرعة الأمواج الانضغاطية فيها. يتم التعبير عن معامل الانعكاس (R) للموجات الصوتية التي تسير خلال الوسط (1) عابرةً السطح الفاصل بين الوسط (1) الى الوسط (2) بالآتي:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 V_{c2} - \rho_1 V_{c1}}{\rho_2 V_{c2} + \rho_1 V_{c1}} \qquad \text{.................}(14\text{-}1)$$

ومن ذلك يكون معامل النفوذ T(أي نسبة ماينفذ من طاقة الامواج الصوتية عبر السطح الفاصل بين وسطين ) كالآتي:

$$T = \frac{2 Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{2\rho_1 V_{c1}}{\rho_2 V_{c2} + \rho_1 V_{c1}} \qquad \text{.................}(15\text{-}1)$$

أي أن :

$$R + T = 1 \qquad \text{.......................}(16\text{-}1)$$

يتضمن الجدول (16-1) قيم الممانعات الصوتية لأوساط مختلفة.

جدول (16-1) الممانعات الصوتية لبعض الأوساط.

| الوسط | الممانعة الصوتية(ميكا باسكال ثانية / متر) |
|---|---|
| الهواء | $4.04\text{x}10^{-4}$ |
| الماء | 1.43 |
| الزيت | 1.58 |
| الألمنيوم | 16.77 |
| النحاس | 41.08 |
| المغنيسيوم | 10.04 |
| الفولاذ المطيل | 45.72 |
| البرسبكس | 3.22 |
| البولي اثيلين | 2.16 |

يعتبر انعكاس الصوت عند السطح بين الهواء والمعدن، من الناحية التجريبية يساوي 100% عند الترددات المستخدمة في الفحص بالأمواج فوق السمعية، ولهذا لا تستطيع هذه الأمواج النفوذ بسهولة الى المعدن عبر فجوة هوائية وإن كانت ضيقة. فإذا تم وضع سائل مثل الزيت او الماء كحلقة وصل أو عامل وصل بين المجس (بلورة محول الطاقة (transducer crystal) والمعدن فسينخفض معامل الانعكاس الى حدٍ ما. فعلى سبيل المثال، يكون الإنعكاس 94 بالمئة ، تقريباً، عند الحد الفاصلبين الزيت والفولاذ، اي بعبارة أخرى، أن حوالي 6 بالمائة من طاقة الصوت الساقط سوف ينفذ عبر السطح الفاصل.

تتحسن كفاءة النفوذ بصورة ملحوظة عندما يكون سمك سائل الوصل بين محول الطاقة (المجس) والمعدن هو فقط جزء قليل جداً من الطول الموجي للحزمة

الصوتية في ذلك الوسط. فعلى سبيل المثال، يقترب معامل النفوذ من القيمة النظرية (13 بالمئة) عندما يكون وجه مجس البلورة مغطى بالبيرسبكس في حالة استخدامه مقترناً مع الفولاذ بشرط ان يكون سمك غشاء سائل الوصل (couplant film) قليلاً. وحيث ان معامل النفوذ يتغير مع سمك الغشاء ومالم تتم المحافظة على قوة ضاغطة ثابتة بين المجس وسطح المعدن، فإن شدة حزمة الأمواج فوق السمعية الداخلة الى المعدن ستكون عرضة للتغيير الملحوظ.

## توليد الموجات فوق السمعية والكشف عنها:

يعتمد توليد الأمواج فوق السمعية ، المستخدمة في الفحوصات اللا أتلافية، على التأثير الكهربائي الاجهادي (Piezo-electric effect) والذي تتصف به بعض أنواع البلورات الطبيعية كالكوارتز (quartz) والاصطناعية كتيتانيت الباريوم (barium titanate) ونيوبات الرصاص (Leadniobate) وكبريتات الليثيوم (Lithium su-phate). تتمدد وتتقلص هذه البلورات بمراحل مع الفولتيه النبضية المسلطة على طرفي البلوره اي على وجهين متقابلين منها. ان هذه الفولتيه تجعل البلوره تهتز عند ترددها الطبيعي.

يكون من المطلوب ، بعد انقطاع هذه الفولتيه، ان تزول او تموت ذبذبات البلوره بأسرع مايمكن .تدعم البلوره عادةً بمادة تخميد (damping material) وذلك لتساعد على أخماد الذبذبات بسرعة. وقد وُجد ان العكس صحيح في التأثير الكهربائي الاجهادي، فالإجهاد الميكانيكي المسلط على مثل هذه البلورات باتجاه معين يولّد تجاوباً كهربائياً، والفولتيه الناتجة تتناسب بشكلٍ مباشر (خطي) مع مستوى الاجهاد. ان وحدة الإستلام المستخدمة في الفحص بالأمواج فوق السمعية هي محول الطاقة الميكانيكية الكهربائية (electro- mechanical transducer) اي انه يحول او يبدل الطاقة الميكانيكية المنبعثة من الأمواج فوق السمعية الى طاقة كهربائية حيث يمكن قياس الفولتيه المستحثة الناتجة.ويمكن ان تعمل البلورة الكهربائية الإجهادية كلا العملين كمرسلة (باعثة)،وكمستلمة للأمواج فوق السمعية، اي يمكن أن تستخدم كمحول طاقه عكسي (reversible transducer) أيضاً.

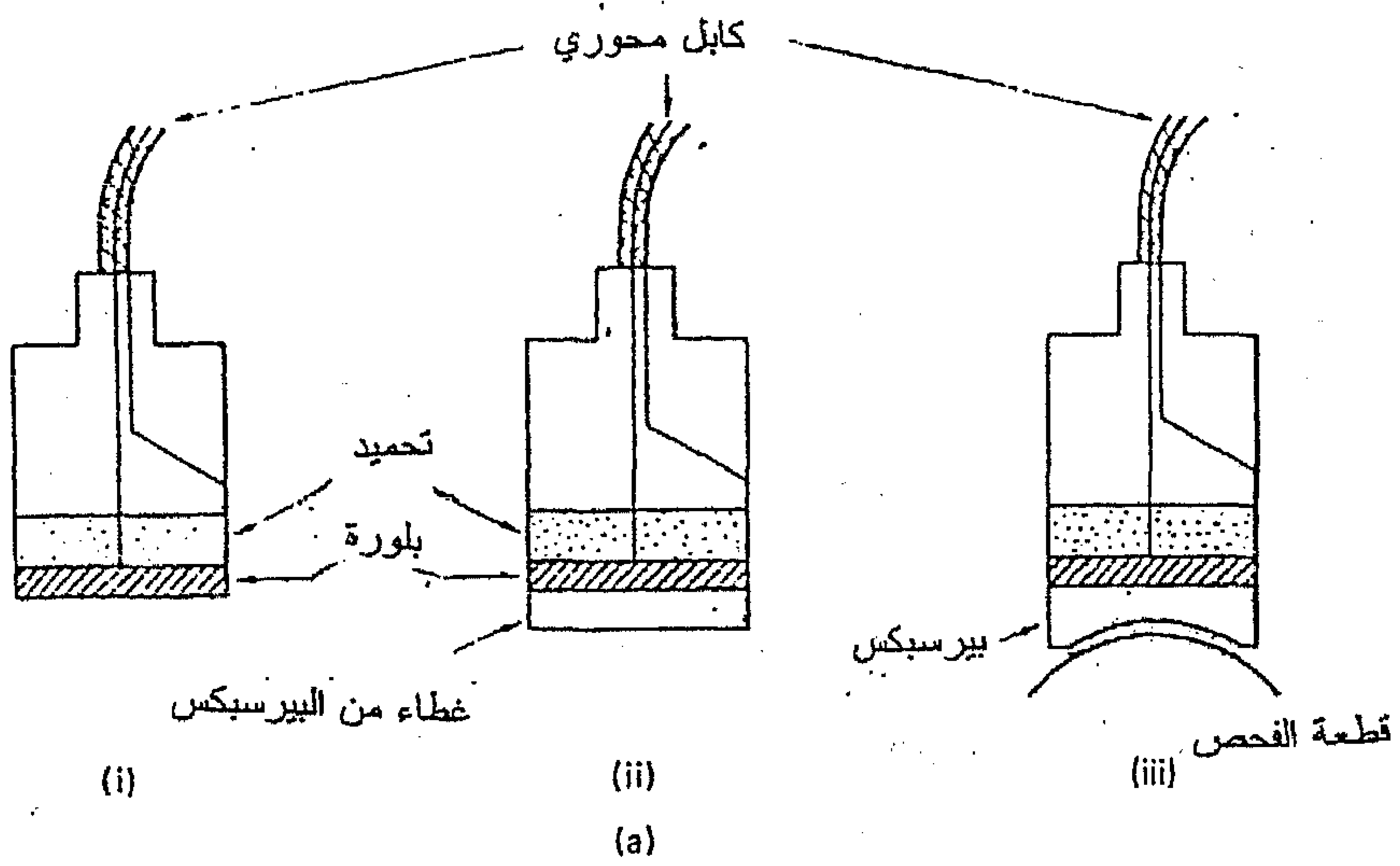
## أنواع المجسات:

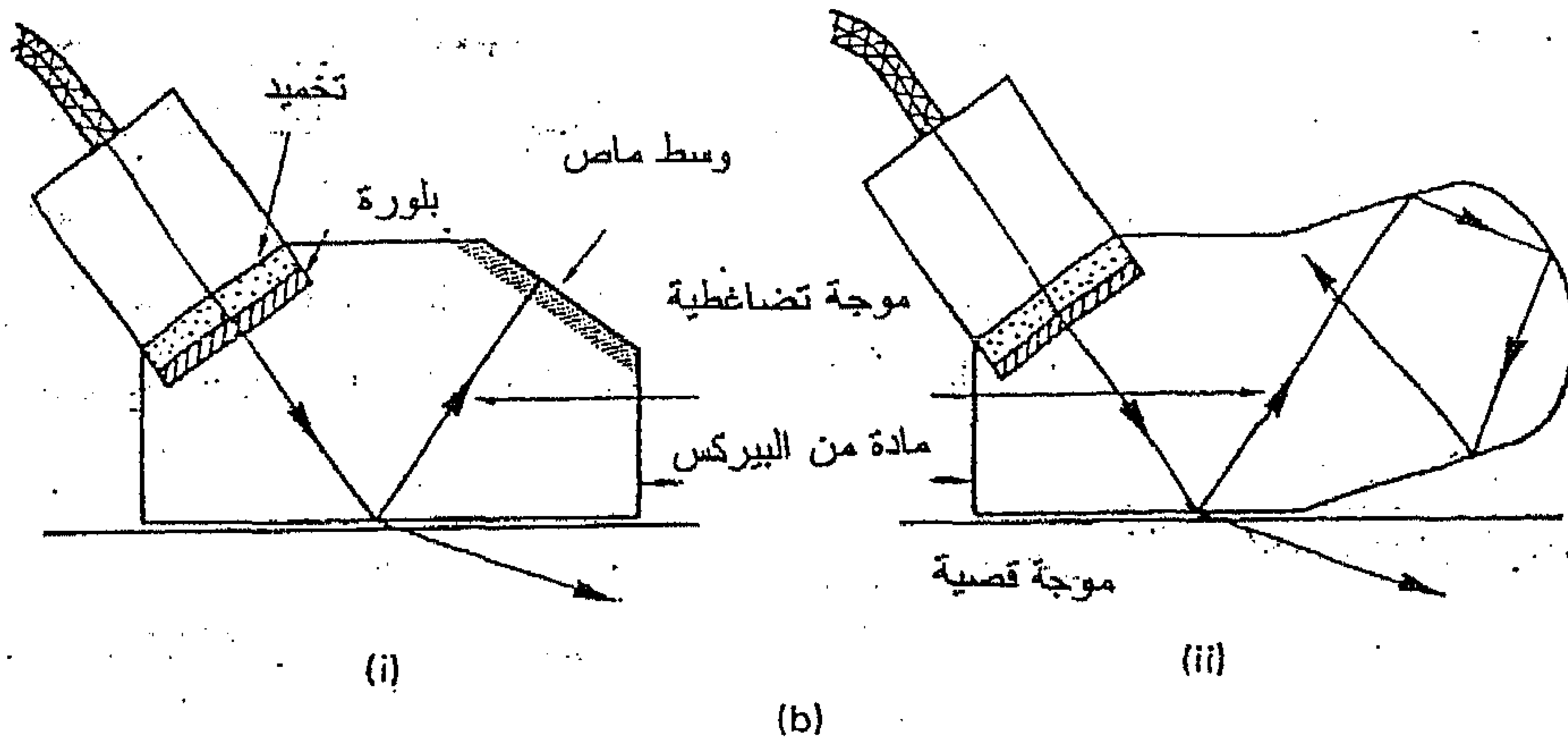
١- المجسات العمودية: لقد تم تصميم المجسات العمودية لتبعث موجات انضغاطية الى داخل المادة تحت الفحص وبزاوية عمودية على سطح المادة. تكون البلورات في بعض الأحيان غير مغطاه بأية مادة حيث توضع على المادة المراد فحصها بصوره مباشرة عبر غشاء رقيق من الزيت او الماء.وكبديل عن ذلك يمكن ان تغطى البلوره بطبقة المعدن او الخزف (Ceramic) او البيرسبكس(Perspex) . وقد يأخذ البيرسبكس نفس انحناء الجزء المفحوص وذلك للمساعدة في إزالة غشاء الهواء عند الفحص، الشكل (53a-1) .

٢- المجسات الزاويّة: تُصمم المجسات الزاوية لترسل امواجاً قصية (مستعرضة) او سطحية (Rayleigh waves) الى داخل المادة المراد فحصها. ان البنية الأساس للمجسات الزاوية مشابهة لتلك التي للمجسات العمودية لكن بفرق واحد هو ان البلورة مطمورة داخل قطعة من البيرسبكس لها شكل معين يسمح للموجات بالدخول الى المادة تحت الفحص بزاوية معينة.يتم انعكاس الموجه الانضغاطية عند السطح بين البيرسبكس والمعدن. ومن المحتمل ان تعود الموجه المنعكسة هذه الى البلورة مرة ثانية لتسبب اشارات مشوشة. ولتجنب ذلك يتم وضع وسط (مادة) ماصة للأمواج في مكان محدد من المجس . أما الطريقة البديلة لتجنب ذلك هو جعل شكل قطعة البيرسبكس بصوره بحيث تجعل الموجه المنعكسة ترتد منعكسة عدة مرات حتى تضمحل طاقتها. ويمكن تحقيق ذلك لأن مادة البيرسبكس لها معامل امتصاص عالي (high absorption coefficient) ، كما في الشكل (53b-1) .

## كشف العيوب:

تدخل الحزمة فوق السمعية الى المنتوج تحت الفحص بالإتصال المباشر بين مجس البلورة والمنتوج (الشكل 1-54). ويجب أن يكون هناك مادة وصل (الزيت عادةً كما ذكرنا) بين المجس والمنتوج او الجزء المراد فحصه لأنه حتى الغشاء الهوائى الرقيق الفاصل (أقل من $10^{-3}$ ملم) سوف يسبب انعكاساً كلياً للأمواج، وليس من الضروري ان يكون سطح المنتوج قد تم تشغيله، إلا أنه يجب إزالة




الشكل (1-53)

مكونات المجس (a) مجسات عمودية (i) مجس غير مغطى (ii)مجس مغطى (iii) مجس عمودي لفحص سطح منحني (b) مجسات زاوية (i) يحتوي على مادة ماصة للصوت (ii) له شكل خاص لإضمحلال الموجه المنعكسة.



الشكل (1-54) فحص بالأمواج فوق السمعية لقضبان مطروقة باستخدام مجس الامواج الإنضغاطية.

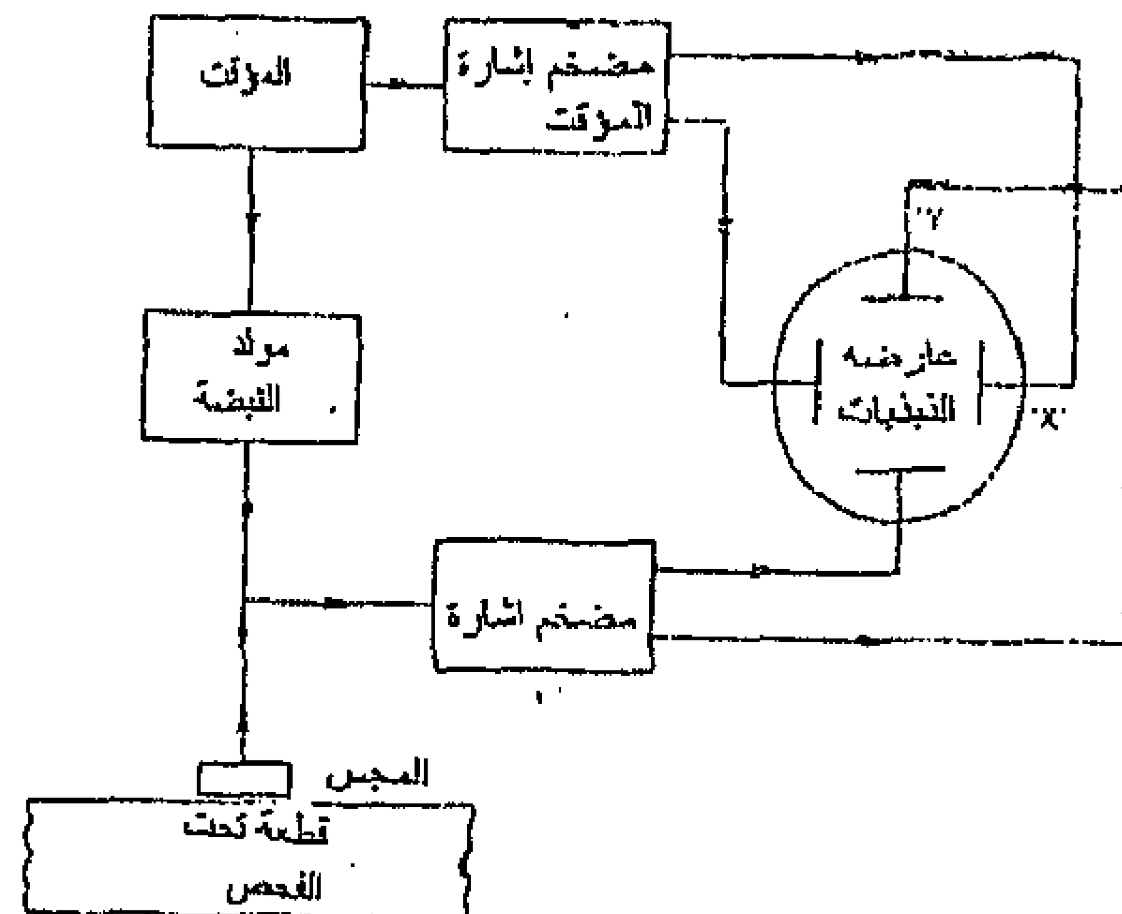
القشوره والصدأ أو أية مواد غريبة أخرى والتي يتعارض وجودها مع الإتصال المباشر للمجس مع السطح.

يمكن استخدام الأمواج فوق السمعية للكشف عن العيب بطريقتين:

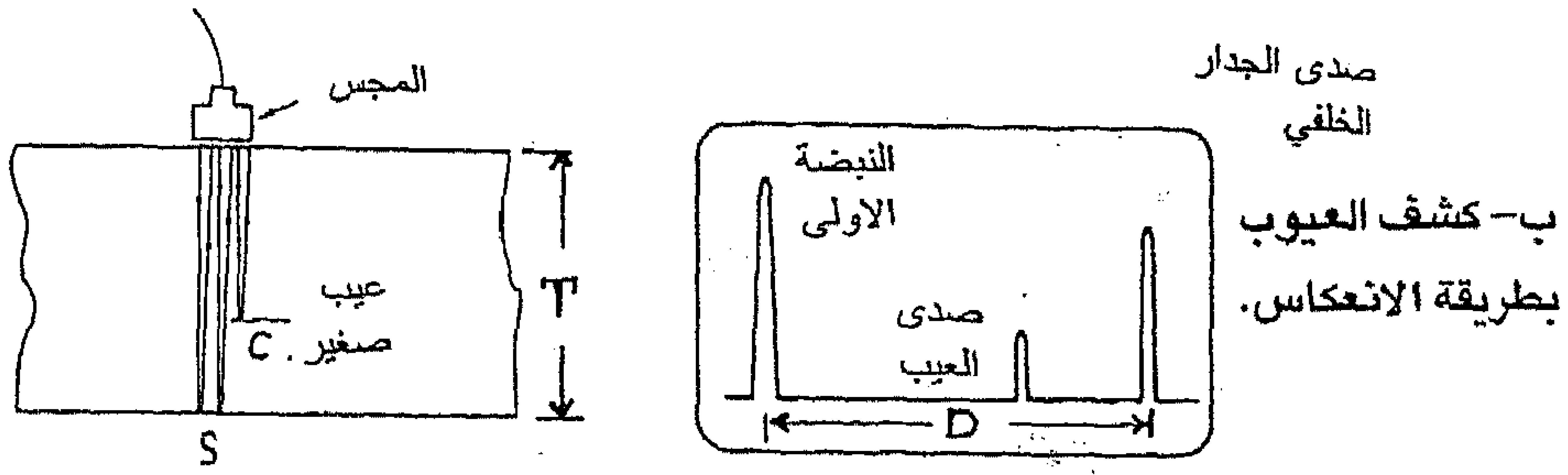
١- طريقة انعكاس النبضات Pulse - reflection method

٢- طريقة النفوذ Transmission method.

١- ان طريقة إنعكاس النبضات هي الطريقة التي تستخدم في الأغلب الأعم. وفي هذه التقنية تدخل نبضات الأمواج فوق السمعية الى الجزء تحت الفحص ويقاس الزمن اللازم لوصول الإشارة النافذة الى الجدار الخلفي للجزء ورجوع الصدى المنعكس منه او من بعض العيوب الوسطية ، ولأية مادة معينة وهذا الزمن يتناسب مع طول مسار الأمواج، بحيث ان الزمن يتناسب مع المسافة. يبين الشكل (1-55) رسماً تخطيطياً لجهاز كشف العيب بالذبذبات فوق السمعية.




الشكل (1-55) (أ) رسم تخطيطي لجهاز كاشف العيب بالأمواج فوق السمعية.




ب– كشف العيوب بطريقة الانعكاس.

ان هذه الطريقة لها بعض المميزات حيث أنه يمكن قياس المسافة من العيب الى البلوره الباعثه المستلمة (transceiver)بشكل دقيق إضافة الى أن هذه القياسات يمكن أن يتم اجرائها من جانب واحد للجزء فقط. ويتم اظهار النبضات النافذة والصدى المنعكس إضافة الى قياس الفترة الزمنية بينهما باستخدام جهاز منظار ذبذبات أشعة المهبط (Cathode ray osscilloscope) . ويمكن ان يعاير الجهاز مباشرةً بوحدات الطول، والمسافة من سطح التماس مع المجس الى العيب يمكن أن تقرأ بالمليمترات عندئذ. ويمكن استخدام آلة التصوير (Camera) لتسجيل الأثر من جهاز منظار ذبذبات أشعة المهبط (CRO) .

وهذه الطريقة موضحة في الشكل (1-55) . فالمجس مربوط بجهاز تضخيم الإشارة (signal amplifier) حيث يتم تضخيم الإشارة قبل أن تعرض على منظار ذبذبات أشعة المهبط. تمر الذبذبات في المادة الخالية من العيوب تماماً، من المجس بصوره غير معاقة أثناء مرورها بالمعدن ثم تنعكس من السطح عند النقطة (S) راجعةً الى المجس، والذي يعمل بدوره كمستلم (receiver) أيضاً. ويتم تسجيل كلاً من النبضة المنبعثة وصداها على منظار ذبذبات أشعة المهبط، فالمسافة (D) بين النبضات (blips) على الشاشة تتناسب مع سمك المادة تحت الفحص (T)، فإذا تواجد اي عيب، مثل الشق في (C) ، فعندئذ سيعترض النبضة فوق السمعية وتنعكس راجعة الى الخلف كما مبين في الشكل (1-55). ولأن هذا الصدى يعود الى المستلم بوقت أقصر، فستظهر نبضه بينيه على شاشة منظار الذبذبات ومكانها بالنسبة الى النبضات الأخرى يشير الى بعد العيب عن السطح.

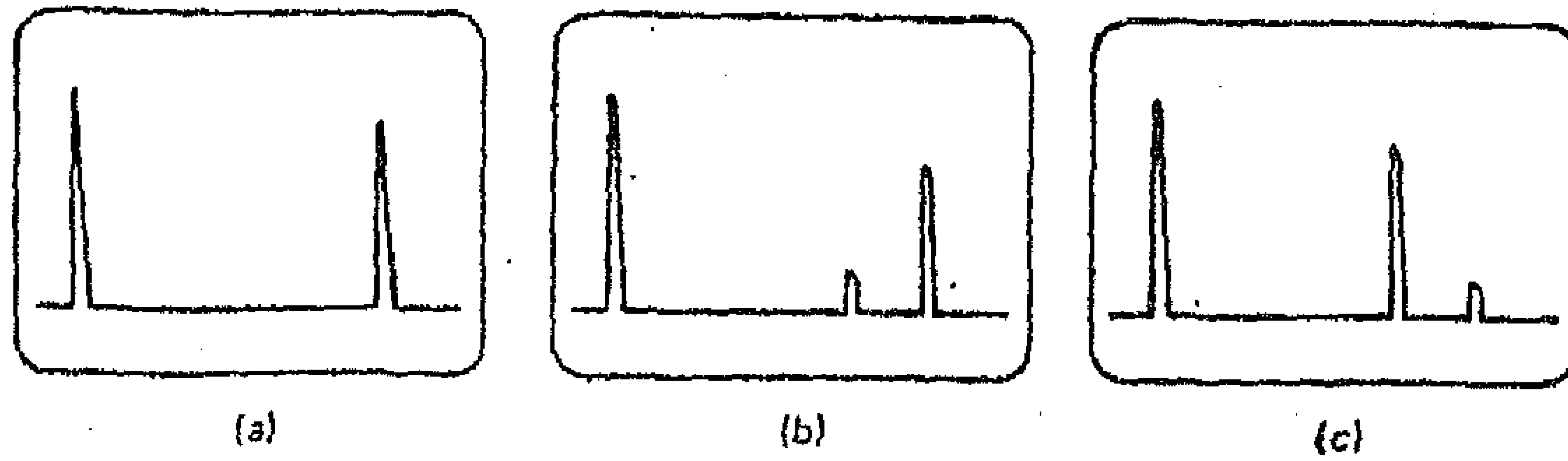
تؤثر البنية الدقيقة للمادة المراد فحصها بصوره فعّالة على الفحص. فالبنية الخشنة (coarse structure) تميل الى تشتيت الطاقة فوق السمعية وعليه فيمكن ان تخلق هذه البنية أكثر من مشكلة أثناء الفحص من نظيراتها البنيه الناعمه (fine structure).

**تحديد العيوب:**

يمكن بوساطة الطرائق فوق السمعية تعيين ليس فقط مكان العيوب الداخلية بالضبط وإنما يمكن أيضاً، وفي أحوال كثيره، تمييز نوع العيب. وسيتم هنا التطرق الى مختلف أنواع الإشارات المنعكسة عن (المستلمة من) أنواع محدده من العيوب التي سيتم التنويه عنها.

أ- العيوب العمودية على اتجاه الحزمة الصوتية:

فعند عدم وجود عيب فسيتم استلام إشارة صدى كبيرة واحدة من الجدار الخلفي للجزء المفحوص. يجب أن يعطي وجود عيب صغير إشارة صدى صغيرة مع انخفاض نسبي في سعة (شدة) إشارة صدى السطح (الجدار) الخلفي. وعندما يكون حجم العيب أكبر من قطر المجس فسيكون صدى العيب كبيراً وقد تختفي إشارة الصدى من السطح الخلفي (الشكل 1-56)، اعتماداً على عمق العيب بالنسبة لإنتشار الحزمة في النقطة البعيدة.




**الشكل (1-56) تاثير حجم العيب في النبضات على شاشة العرض**

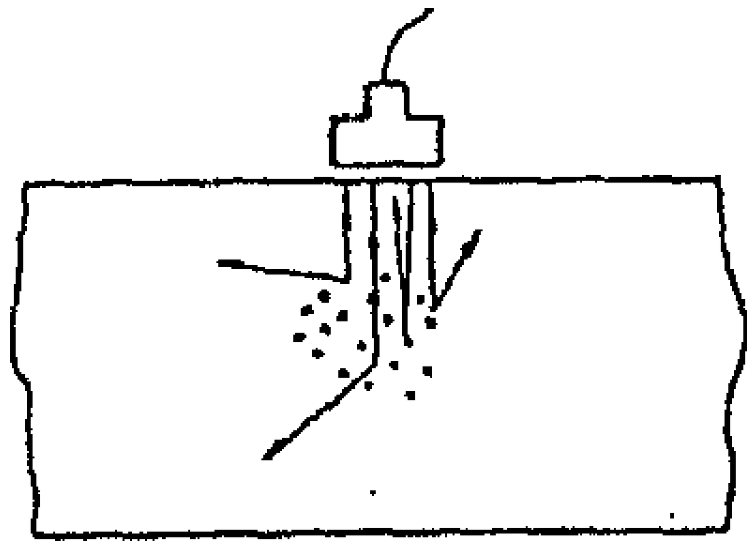
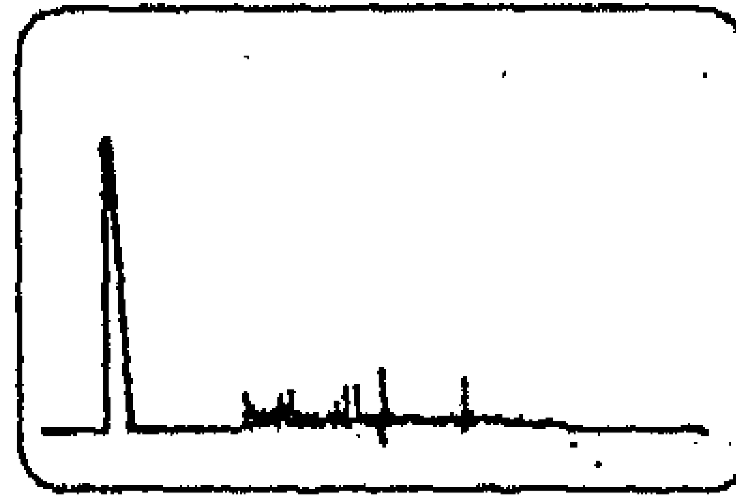
**a- من جزء خالي من العيب- تظهر النبضة الأولى والنبضة المنعكسة عن الجدار الخلفي.**

**b- صدى عن عيب صغير مع صدى كبير عن الجدار الخلفي.**

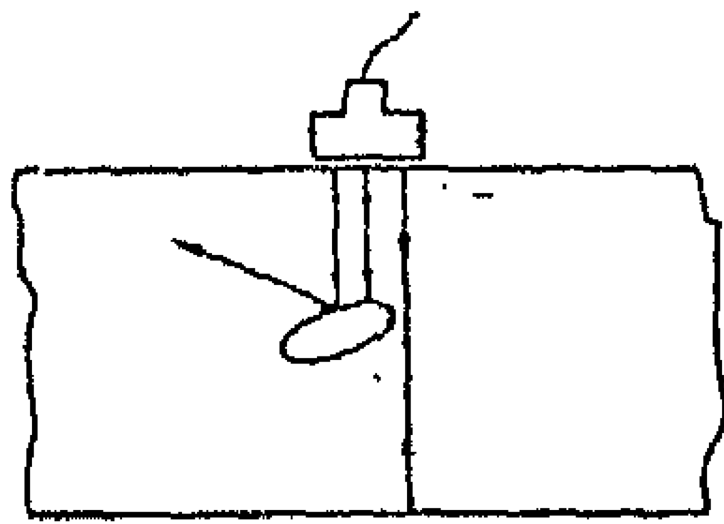
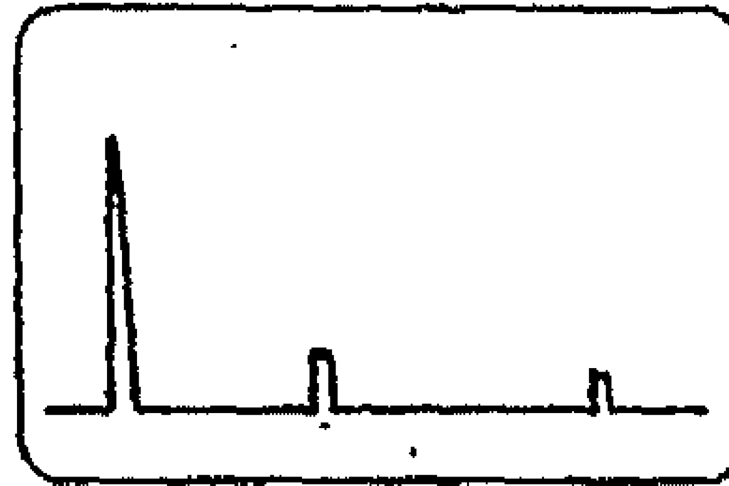
**c- صدى عيب كبير مع صدى صغير عن الجدار الخلفي.**

ب- العيوب الاخرى غير المستوية:

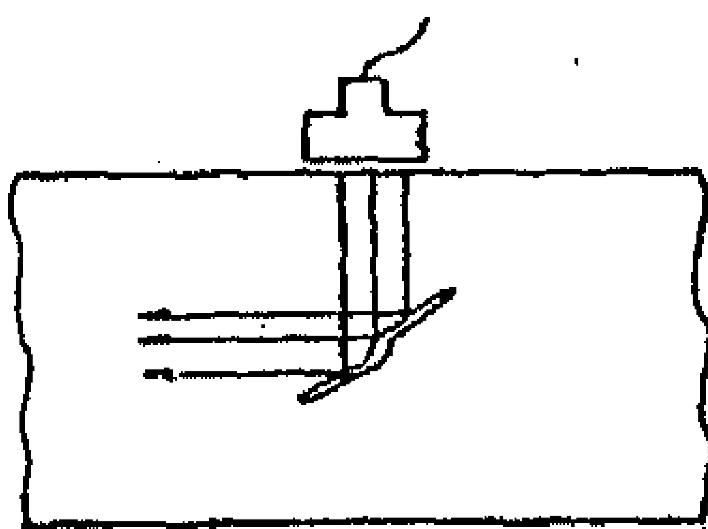
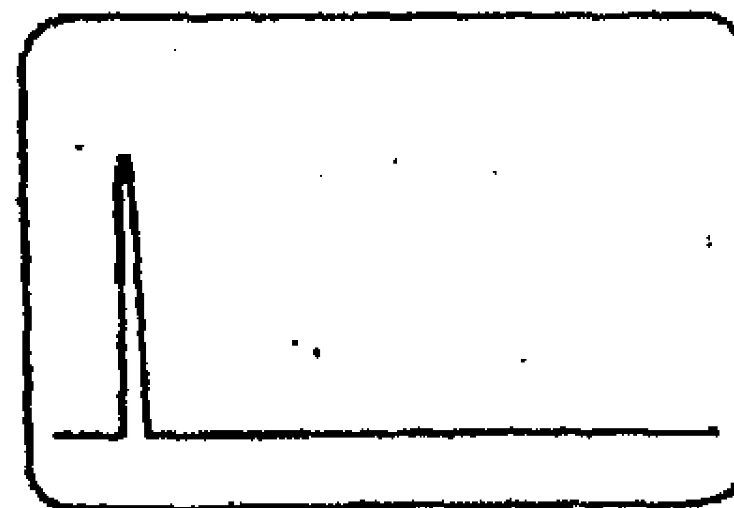
تؤدي مناطق المسامات الدقيقة الى تشتتٍ في الحزمة بصوره عامة معطية إشارة تشبه الحشيش (grass) على شاشة منظار ذبذبات أشعة المهبط مع فقدان إشارة صدى الجدار الخلفي كما في الشكل(57a-1). تميل الفجوة الهوائية او الاكتنافة (inclusion) البيضوية الشكل الى أن تعطي صدى عيب صغير مقترناً مع إشارة صدى من السطح الخلفي صغيرة ايضاً (الشكل 57b-1 ). وعندما لاتظهر على الشاشة اية إشارة بالمرة فقد يكون ذلك علامة على وجود عيب مستوٍ مائل بزاوية غير عمودية بالنسبة لإتجاه الحزمة الصوتية (الشكل57c-1 ). وهناك علامات للعيوب الأخرى لامجال لذكرها هنا، ويمكن الرجوع الى المصادر المتخصصة لمعرفتها.

(a)

(b)

(c)

**الشكل(57-1) عيوب مختلفة الأنواع مع نمط نبضاتها على الشاشة**

a- **مسامية دقيقة** Micro - porosity.

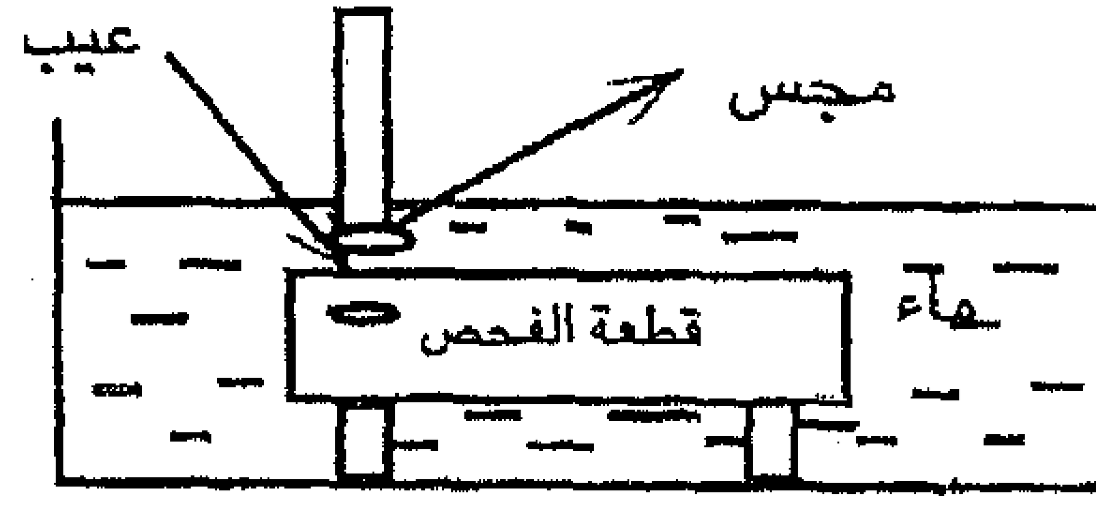
b- **عيب بيضوي** Elliptical defect.

c- **عيب مائل** Large angled defect..

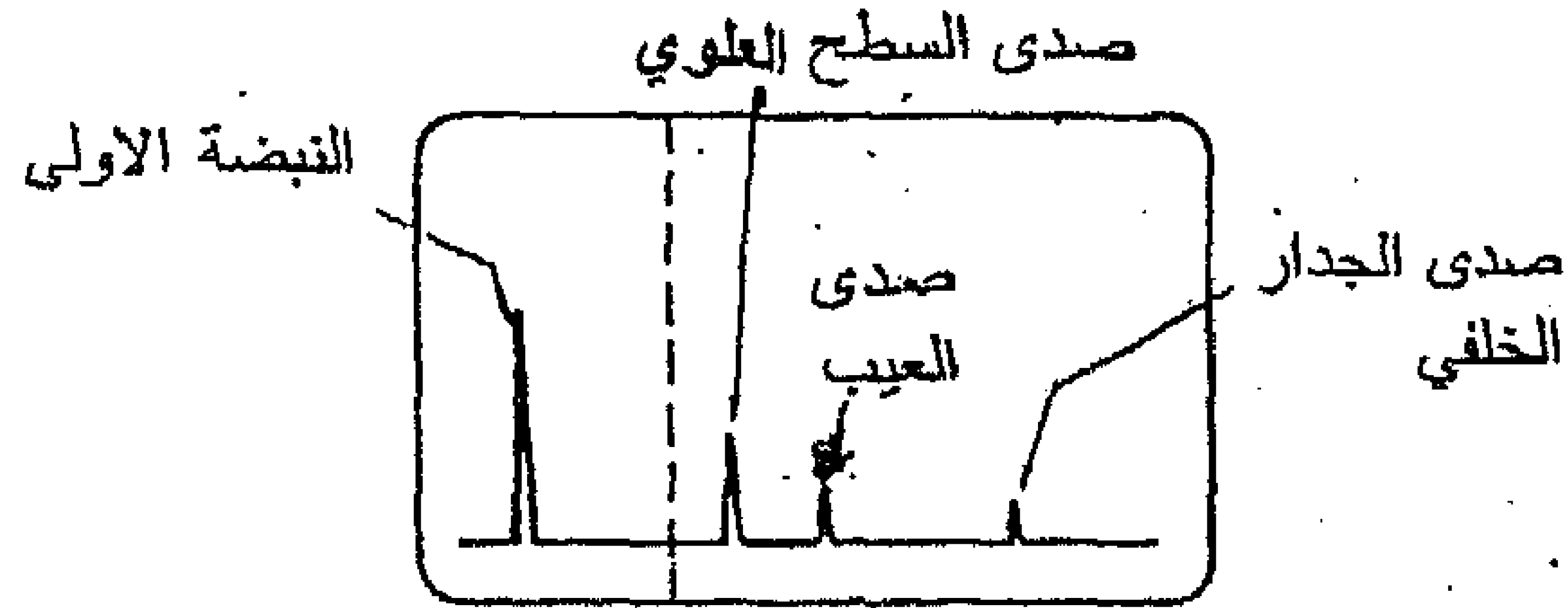
الفحص عند الغمر : Immersion testing

تُعرَف كل تقنيات الفحص التي ذكرت لحد الآن بتقنيات المسح المباشر (contact scanning) حيث تتم فيها المحافظة على المجس او المجسات في حالة تماس مباشر مع سطح المادة تحت الفحص ومن خلال غشاء رقيق من سائل الوصل (Liquid couplant) . من الممكن ايضاً استخدام جهاز المسح عند الغمر immersion scan-ning) والتي يتم فيها غمر الجزء المراد فحصه في حوض ماء ثم يوضع المجس في الماء ايضاً فوق الجزء المراد فحصه بمسافة. تلائم تقنية الفحص هذه بصوره مثالية للأجزاء الكبيرة المعمولة والمنتهية في مصنع انتاجي ، وتكون أجهزة الفحص، في هذه الحالة، مؤتمته بصورة تامة عادةً. فعلى سبيل المثال، تستخدم هذه التقنية لفحص الألواح المعدنية قبل تشغيلها لتكون أجزاء لهيكل الطائرة وكذلك فحص أقراص التوربين الغازي وفحص عجلات الطائرات.

تظهر على شاشة جهاز منظار الذبذبات، أثناء الفحص، نبضة خاصة بالسطح بين الماء والمعدن (water / metal interface) كما تظهر نبضة الصدى من السطح الخلفي للمادة تحت الفحص ، فإن ظهرت نبضة بين هاتين النبضتين دلّ ذلك على وجود عيب في المادة المفحوصه كما مبين في الشكل (1-58) . يجب أن تضبط وتراعى المسافة بين المجس والمادة تحت الفحص بحيث أن نبضات الصدى المعاد عند السطح الفاصل بين الماء والمعدن لا تظهر (أو لاتؤخذ بالحسبان) ضمن طول محور الزمن الأساس(time base) المقابل لسمك المعدن. يمكن أن يضبط او يرتب محور الزمن الأساس بحيث تكون القمة (النبضة) الأولى، على جهة يسار شاشة العرض ، خاصة بالسطح الفاصل بين الماء والمعدن . يتم تزويد اغلب الاجهزة المؤتمته (المحوسبة) المصممة لتلائم الفحص تحت الماء بالراسم البياني (chart recorder) أو الراسمة وذلك لتسجيل او رسم اماكن العيوب على ورقة ملائمة، وبذلك يتم الحصول على تسجيل دائم لخارطة العيوب المتواجدة في القطعة المفحوصة.



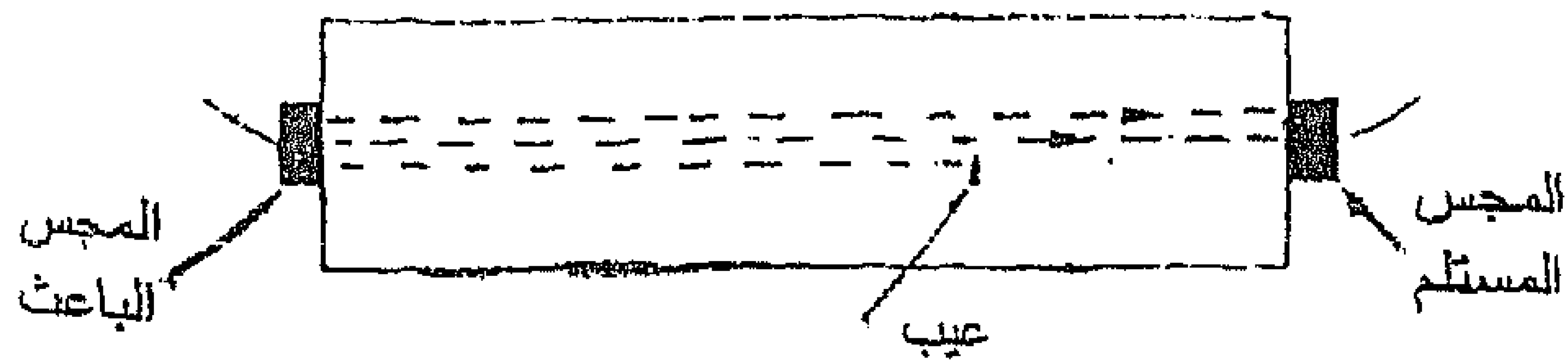

(a)

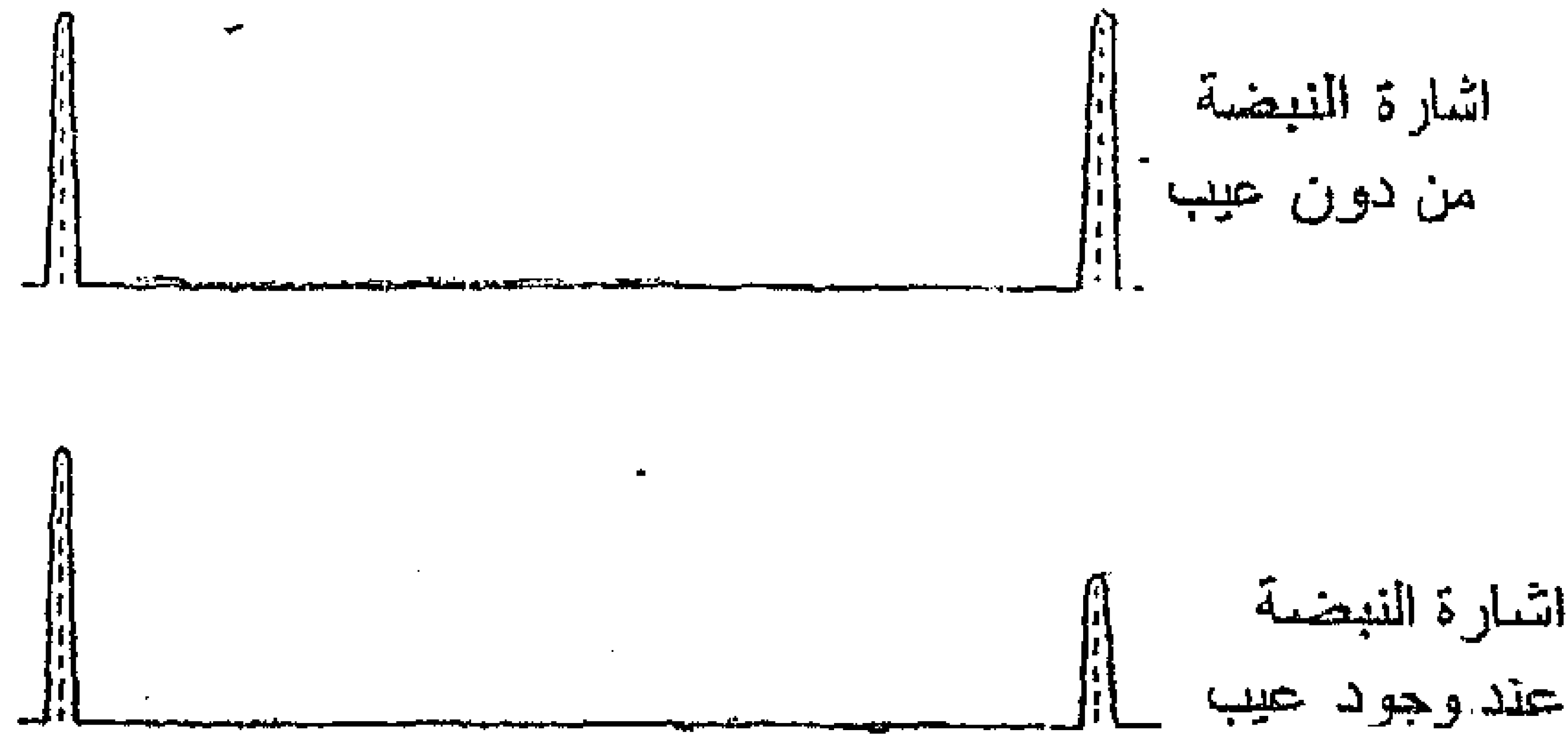



(b)

الشكل(1-58) الفحص بتقنية الغمر.
(a) وضع القطعة المراد فحصها في الماء و المجس.
(b) النبضات الظاهرة على الشاشة وتفسيرها.

٢– اما في طريقة الأمواج النافذة ، فتستخدم حزمة مستمرة من الامواج فوق السمعية . فيتم وضع مجسان على جهتين متقابلتين من الجزء المراد فحصه أحدهما وهو المرسل او الباعث (transmitter) والآخر هو المستلم (receiver) فتمر حزمة الامواج فوق السمعية من المجس الأول (الباعث) الى المجس الثاني (المستلم) كما مبين في الشكل (1-59) .




الشكل(1-59) طريقة النفوذ في كشف العيوب بالأمواج فوق السمعية.

وفي هذه الطريقة تظهر قمتين (نبضيتين) فقط على شاشة منظار ذبذبات أشعة المهبط، الأولى من جهة اليسار تمثل القمة المنبعثة اما تلك التي علىالجهة اليمنى فتمثل شدة الحزمة الواصلة الى ا لمجس المستلم . تظهر في حالة الجزء السليم تماماً قمتين اثنتين متساويتين في الإرتفاع، إلا أنه عند وجود عيب ما، فيختزل ارتفاع القمة التي على الجهة اليمنى، لأن جزءاً من طاقة الحزمة سوف ينعكس عن الثغرة (العيب) الى الباعث وبذلك ينحجب جزء من طاقة الموجه عن الوصول الى المستلم.

يجب ان يكون سطحا الجزء الموضوع عليهما المجسين متوازيين، في حالة طريقة الامواج النافذة ، لأنه في حالة وصول حزمة الامواج فوق السمعية الى الوجه المقابل بزاوية فسيكون هناك انكسار بالإضافة الى الانعكاس.

ومن المفضل استخدام طريقة انعكاس النبضات للأسباب التالية:

أ- يلزمنا مجس واحد هو باعث ومستلم .

ب- يستخدم سطح واحد فقط من الجزء المراد فحصه.

جـ- لايلزم ان يكون السطح الخلفي للجزء موازياً للوجه المقابل.

**تطبيقات الفحص بالأمواج فوق السمعية:**

يمكن الكشف عن التصفيحات (Laminations) والثنيات (seams) وشقوق الدحو (rolling cracks) إضافة الى الاكتنافات (inclusions)في صفائح الفولاذ والقضبان المسطحة التي سمكها يتراوح بين 5 ملم الى 30 ملم. ويمكن ان يتم كشف الثغرات التي حجمها بحدود 0.5% من سمك الصفيحة بسهولة كما هي الحالة في التصفيحات التي يصل سمكها الى حد 0.0005 ملم. أما القضبان والمطروقات والمسبوكات والكتل المعدنية التي يصل قطرها حتى 1.5متر فيمكن اختبارها للكشف عن الثغرات الانبوبية (piping) والإنكماش والتشقق وتستخدم هذ الطريقة بشكل واسع أيضاً لفحص الملحومات.

**٥-١ خاتمة:**

وفي ختام هذا الفصل يمكن اختصار الاستعمالات والمزايا للأنواع المختلفة من طرائق الفحص اللا اتلافي في الجدول (1-17) .

جدول (1-17) استخدامات ومزايا طرائق الفحص اللا اتلافي المختلفة.

| التقنية | الذبذبات فوق السمعية | الأشعة السينية | التيارات الدوامة | الدقائق المغناطيسية | السوائل المتغلغلة |
|---|---|---|---|---|---|
| الكلفة الكلية الاساسية | متوسطة الى عالية | عالية | منخفضة الى متوسطة | منخفضة جداً | منخفضة جداً |
| كلفة مايستهلك | منخفضة جداً | عالية | منخفضة | متوسطة | متوسطة |
| النتائج | آنية | تتطلب وقت | آنية | آنية تقريباً | تتأخر قليلاً |
| تأثير هندسة الجزء | مهمة | مهمة | مهمة | غير مهمة عادةً | غير مهمة عادة |
| مسالة الوصول الى الجزء | مهمة | مهمة | مهمة | مهمة | مهمة |
| نوع العيوب | داخلية | اغلبها | الخارجية | الخارجية | السطحية |
| الحساسية النسبية | عالية | متوسطة | عالية | منخفضة | منخفضة |
| التسجيل الاساس | غالي | قياسي | غالي | غير متعارف | غير متعارف |
| خبرة الفاحص | عالية | عالية | متوسطة | منخفضة | منخفضة |

تكملة الجدول (1-17)......

| التقنية | الذبذبات فوق السمعية | الأشعة السينية | التيارات الدوامة | الدقائق المغناطيسية | السوائل المتغلغلة |
|---|---|---|---|---|---|
| تدريب الفاحص | مهمة | مهمة | مهمة | مهمة | مهمة |
| الحاجة الى التدريب | عالية | عالية | متوسطة | منخفضة | منخفضة |
| قابلية حمل الأجهزة | عالية | منخفضة | عالية الى متوسطة | عالية الى متوسطة | عالية |
| التأثر بالتكوين الكيماوي | شديد | الى حد بعيد | شديد | المواد المغناطيسية فقط | قليل |
| القابلية على الأتمته | جيدة | معتدلة | جيده | معتدلة | معتدلة |
| لها القدرة كذلك على | قياس السمك والى حد ما التكوين الكيماوي | قياس السمك | قياس السمك وتصنيف المواد | كشف العيوب فقط | كشف العيوب فقط |

## تمارين الفصل الأول

١- ماهي طبيعة وأنواع العيوب في المواد وعلى اي أساس يعتمد قبول الجزء المنتج او رفضه؟

٢- عرّف الفحوصات اللا أتلافية والأتلافية وأضرب أمثلة على ذلك.

٣- عدد طرائق الفحص اللاأتلافي الملائمة للعيوب السطحية وأشرح واحدة منها.

٤- ماهي طرائق توليد المجال المغناطيسي بأنواعه، وكيف يمكن التمييز في بعض الأحيان بين العيوب السطحية وتحت السطحية في الفحص بتقنية الدقائق المغناطيسية؟

٥- كيف تزال المغناطيسية المتخلفة في الجزء المفحوص بتنقية الدقائق المغناطيسية.

٦- ماهو مصدر الأشعة السينية وأشعة كاما والنيوترونات المستخدمة في تقنية الفحص الشعاعي؟

٧- ما هو الفرق بين أشعة كاما والأشعة السينية؟

٨- لماذا يجب الاحتراس أكثر وبصورة دائمة من مصادر أشعة كاما؟

٩- على اي أساس يعتمد الفحص الشعاعي بصورة عامة.

١٠- كيف يتم توليد الذبذبات فوق السمعية المستخدمة في الفحوصات اللا أتلافية؟

١١- بماذا تمتاز تقنية الفحص بالأمواج فوق السمعية بطريقة الانعكاس (الصدى) على طريقة النفوذ؟

١٢- على أي أسس يتم اختيار التردد الملائم عند الفحص بتقنية الذبذبات فوق السمعية، أعط مثالاً على ذلك.

١٣- هل يمكن استخدام التيار المباشر (DC) لتوليد التيارات الدوامة ولماذا ؟

١٤- الى اي مدى تتغلغل التيارات الدوامة تحت سطح الجزء المفحوص وعلى اي العوامل تعتمد هذه المسافة. وماهي محدوديات ومزايا الفحص بالتيارات الدوامة ؟

١٥- ماهي الغاية من الفحوصات اللا أتلافية ؟

# الفصل الثاني

# طرائق قياس درجات الحرارة

## ١-٢ المقدمة:

قد يُعتقد للوهلة الأولى ان قياس درجات الحرارة شيء سهل وميسور، والواقع هو خلاف ذلك فلمعرفة درجة الحرارة المضبوطة يجب معرفة اولاً في اي مدى تقع درجة الحرارة هذه وبأية دقة يراد القياس وذلك لإختيار التقنية المناسبة للقياس. جاءت أهمية تحديد درجة الحرارة المضبوطة في حقل هندسة المعادن، عل سبيل المثال، لتأثيرها على خواص المواد المعدنية.

ان معظم العمليات الميتالورجيه تتضمن معاملة المعدن او السبيكة عند درجات حرارية عالية نسبياً، إضافة الى ضرورة السيطرة وبصوره مضبوطة على درجة الحرارة للحصول على الخواص المثلى في العديد من السبائك. فيمثل قياس درجات الحرارة العالية او البايرومتري ( Pyrometry) أحد أهم فروع تقنيات هندسة المعادن.

## ٢-٢ مقاييس درجات الحرارة:

كانت تستخدم في الماضي ثلاث مقاييس لدرجات الحرارة. وقد تم أخذ الماء كمعيار لذلك، باعتباره الأكثر وفرة في الطبيعة. هذه المقاييس هي:

أ- المقياس المئوي (celsius) وهو مقسم الى مئة تقسيم حيث تم اعتبار درجة تجمد الماء المقطر فيه هي الصفر ودرجة غليانه هي مئة.

وهذا المقياس كان مستخدماً في أغلب دول العالم عدا انكلترا وأمريكا، ووحداته هي درجة مئوية (مْ).

ب- المقياس الفهرنهايتي (Fehrenheit) وفيه تعتبر درجة تجمد الماء، المقطر 32 ودرجة غليانه 212 ، وقد كان سائداً في أمريكا و انكلترا ، ووحداته هي درجة فهرنهايتيه.

جـ- المقياس المطلق او الأساس (Absolute) وهو المقياس المعتمد على القانون الثاني في الثروموديناميك (الديناميك الحرارية) عند تطبيقه على الغاز المثالي. ووحداته هي الكلفن (Kelvin) "K" . لهذا المقياس نفس تقسيمات المقياس المئوي اي ان هناك مئة تقسيم من نقطة تجمد الماء الى غليانه تحت الظروف القياسية. تقابل نقطة تجمد الماء(الصفر المئوي$0^{\circ}C$ ) الى 273 مطلقة في حين تقابل نقطة غليانه 373K في النظام المطلق. لذلك كان الصفر المطلق مساوياً الى $273^{\circ}C$ - وهي اصغر درجة ممكن تصورها.

أما الآن وحسب نظام الوحدات العالمي (SI units) فإنه لايجوز استخدام مقياس الفهرنهايت. وقد أخذ النظام المطلق لقياس درجات الحرارة كقياس نظامي عالمي. كما أجاز النظام الدولي للوحدات استخدام النظام المئوي جنباً الى جنب مع مقياس درجات الحرارة المطلقة وذلك للعلاقة البسيطة بينهما وهي أن درجة الحرارة المطلقة (X) تساوي درجة الحرارة المئوية($^{\circ}C$) + 273 .

٣-٢ قانون الغازات العام:

ينص هذا القانون رياضياً على أن

$$PV = RT \quad ..........................(2-1)$$

حيث يمثل:

P: ضغط الغاز.

V: حجمه .

R: ثابت الغازات العام (8.31 J/mole.K)

T: درجة حرارة الغاز المطلقة.

يتحقق قانون الغازات اعلاه في حالة «الغاز المثالي» وحيث أنه لايوجد غازات

مثالية من هذه الناحية فيمكن عملياً استخدام غاز الهيدروجين او النيتروجين لأن مقدار انحرافهما عن الغاز المثالي معروف لذا يمكن اجراء التصحيح الملائم عند ذلك . فيمكن استخدام الجهاز المسمى محرار غاز الحجم الثابت لقياس درجات الحرارة وبتطبيق قانون الغازات. والجهاز متكون من كره مقاومة لدرجات الحراره تحتوي على غاز الهيدروجين او النيتروجين. وعندما ترتفع درجة الحرارة يبدأ الغاز بالتمدد، فإذا تم منعه من التمدد (وذلك بتثبيت حجمه) فيزداد ضغطه . تقاس هذه الزيادة في الضغط. وحيث ان الضغط يتناسب طردياً مع درجة الحرارة لذا يمكن قياس درجة الحرارة بهذه التقنية.

وبالرغم من ان محرار غاز الحجم الثابت جهاز قياس أساسي لدرجات الحرارة إلا أنه ضخم نسبياً وقابل للكسر وغير ملائم تماماً لقياس درجات الحرارة في العمليات الميتالورجية الروتينية، كالمعاملات الحرارية والدحو على الحار (hot rolling) وغيرها . ومع ذلك فقد تم استخدامه لقياس درجات انصهار العديد من المعادن النقية والمركبات. وقد اعتبرت هذه الدرجات قياسية لأنها مقادير ثابتة لاتتغير عند تكرار قياسها، ولذلك اتخذت لمعايرة الكثير من أجهزة قياس درجات الحرارة (Pyrom-eters) وبصوره ملائمة. يبين الجدول (2-1) الدرجات القياسية المستخدمة غالباً.

جدول (2-1) درجات انجماد بعض المواد النقية بالقياس المئوي

| المادة | الرمز الكيماوي | درجة الانجماد(°C) |
|---|---|---|
| الزئبق | Hg | -38.9 |
| القصدير | Sn | 231.8 |
| الرصاص | Pb | 327.3 |
| الخارصين | Zn | 419.4 |
| الانتيمون | Sb | 630.5 |
| كلوريد الصوديوم | NaCl | 801.0 |
| الفضة | Ag | 960.5 |
| النحاس | Cu | 1083.0 |
| البلاديوم | Pd | 1555.0 |
| التنكستن | W | 3400.0 |

وعليه يمكن استخدام الدرجات اعلاه لمعايرة أغلب أجهزة درجات الحرارة كالمحارير (thermometers) والمزدوجات الحرارية (thermocouples) .

## ٤-٢المحارير:

تعتمد أجهزة قياس درجات الحرارة بشكل عام على تغيّر أحد الخواص الفيزياوية مع درجة الحرارة وبصوره خطية في الغالب كتمدد المادة او تغير مقاومتها الكهربائية او تغيّر لونها وغير ذلك من الخواص.

وبناءً على ذلك يمكن استخدام عمود من الزئبق أو أي بسائل ملائم (كالكحول) لهذا الغرض. وقد تم تصنيع المحرار الزئبقي لقياس درجات الحرارة. يتكون المحرار الزئبقي من أنبوب زجاجي شعري مستقيم مغلوق وفي أسفله خزان صغير يحتوي على قليل من الزئبق يسمى بصلة المحرار. وقد تم تدريج المحرار بشكل خطي حيث جعلت درجة تجمد الماء المقطّر مساويه للصفر (في القياس المئوي) ودرجة غليانه مساوية الى مئة درجة.

وبما أن تمدد الزئبق يتناسب طردياً مع ارتفاع درجة الحرارة كالآتي:

$$L=L_o(1+\alpha t). \quad ..................(2-2)$$

حيث أن:

$L$: طول عمود الزئبق عند درجة الحرارة $t(^{\circ}C)$

$L_o$: طول عمود الزئبق عند الصفر المئوي

$\alpha$ – معامل التمدد الحراري الخطي للزئبق ($^{\circ}C^{-1}$)

يمكن استخدام المحرار الزئبقي الى حد حوالي $350^{\circ}C$ . أن استخدامه محدود في العمليات الميتالورجية، كما أن اقل درجة يمكن قرائتها فيه هي درجة تجمد الزئبق($-38.9^{\circ}C$) او اعلى بقليل. يمكن رفع الحد الأعلى فيه الى $550^{\circ}C$ وذلك بملء القسم العلوي من الساق الزجاجية بغاز النيتروجين المضغوط ، ومع ذلك لا يزال هذا الحد من درجات الحراره اقل من المطلوب بصوره عامة كما أنه قابل للكسر وغالي نسبياً.

## ٥-٢ الأقلام والمؤشرات الصبغية:

لهذه المواد استخدامات خاصة، على سبيل المثال، عندما تتم معاملة بعض الاجزاء الفولاذية حرارياً، تتغير الوان الأقلام او الصبغات هذه او هيئتها عند درجات حرارية معلومة. فتوضع علامة على جزءٍ ما ثم يتم التسخين حتى يحصل تغيير في لون العلامة او هيئتها.

ومن فوائد هذه المؤشرات ضمان وصول الجزء الى الدرجة الحرارية المطلوبة وليس مجرد ما تشير اليه قراءة المقياس الموجود في الفرن على سبيل المثال، من درجة حرارية كما هو عليه في كل الأفران فقد تختلف درجة الجزء المسخن عن درجة الحرارة التي يسجلها المقياس . كما ان هذه الطريقة مفيدة عند تعيين درجة الحرارة في الجزء المسخن موضعياً، كما في حالة التسخين الذي يسبق اللحام او حني الأنابيب وفي ازالة الاجهادات موضعياً.

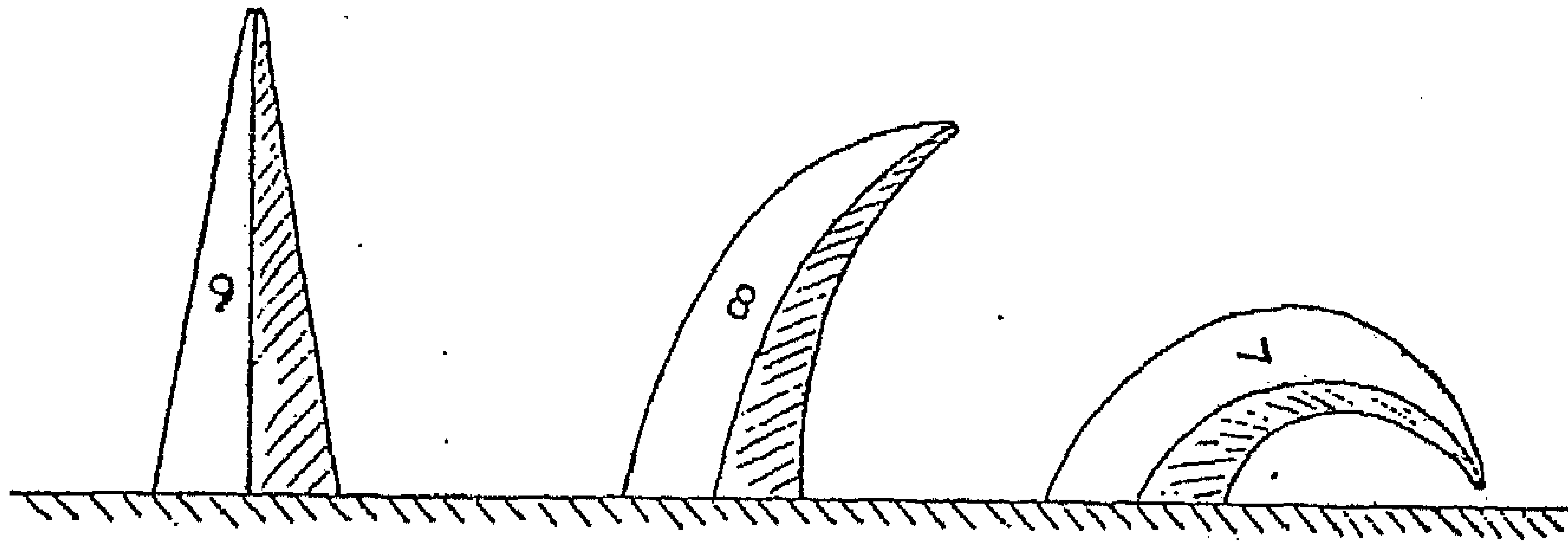
## ٦-٢ الكرويات والمخاريط المؤشرة:

ان مايعرف بمخاريط سيجر (Seger cones) هي عبارة عن اهرام مثلثة القاعدة تصنع من مخاليط متنوعة من الكاؤولين والفلسبار والكوارتز والمغنيسيا والكلس واوكسيد الحديد وحامض البوريك ثم يتم ضبط التكوين الكيماوي لكل هرم بحيث انه يذوي وأخيراً ينهار عند درجة حرارة معينة.

تستخدم عدد من هذه المخاريط التي لها درجات انصهار مختلفة بحيث تمثل مدى من درجات الحرارة تقع ضمنه الدرجة المقدّرة حيث توضع على لوح او بلاطه مسطحة وفي مكانٍ ملائم يمكن مشاهدته. حيث يكون المعيار لدرجة الحرارة في النهاية هو انحناء رأس الهرم ومن ثم يلامس الأرضية الموضوع عليها نتيجة لبلوغه هذه الدرجة . كما مبين في الشكل (2-1) .

يمكن يتم تقدير درجة الواقعة بين 600 و $2000\ ^{\circ}C$ مئوي بهذه الطريقة. والمواخذة الأساسية عند استخدام مخاريط سيجر هي ان نهاية المخاريط تتأثر بمعدل التسخين وطبيعة جو الفرن.

تستخدم الكريات الكاشفة لدرجات الحرارة الأعلى من $900\ C^{o}$ وتذوب بصورة مفاجئة عند الدرجة المحددة وبخطأ لايتجاوز $\pm1\%$.




الشكل (2-1)

مخاريط سيجر، يشير الهرم ذو الرقم 7 الى الدرجة الصحيحة.

## ٢-٧ أجهزة قياس درجات الحرارة بالمقاومة الكهربائية
## (Electrical Resistance pyrometers)

تبنى هذه الاجهزة على حقيقة كون المقاومة الكهربائية لسلك معدني تزداد بزيادة درجة الحرارة. والمعدن المستخدم بصفة عامة هو البلاتين وعلى هيئة سلك رفيع ملفوف على قطعة ملائمة الشكل من الميكا (mica) حيث توضع المجموعة في انبوبه مقاومة لدرجات الحرارة العالية. يستخدم هذا الجهاز كمحرار لقياس درجة الحرارة حتى $600\ ^{o}C$:

أما العلاقة بين درجة الحرارة والمقاومة فهي:

$$R_t=R_o(1+\beta t) \qquad \text{.................}(3\text{-}2)$$

$R_t$: مقاومة السلك عند درجة t مئوي.

$R_0$: مقاومة السلك عند درجة الصفر المئوي.

β: معامل درجة الحرارة للمقاومة الكهربائية ($\mathring{C}^{-1}$) وهو ثابت لكل مادة.

تشذ المعادلة (2-3) عند الدرجات العالية. والعلاقة الدقيقة بين الصفر و 600 $\mathring{C}$ هي:

$$R_t = R_o\ (1+ at + bt^2) \qquad \text{......................... (4-2)}$$

حيث ان:

bو a ثابتان يتعلقان بمحرار المقاومة الكهربائية البلاتيني ذاته:

يتم تعيين التغيير في المقاومة بوساطة دائرة كهربائية من نوع قنطرة وتستون (wheatstone - bridge) اما درجة الحرارة فتحدد من جدولٍ قياسي معد مسبقاً او بموجب المعادلة (2-3) بعد معرفة قيمة (β) والتي يمكن استخراجها عملياً باستخدام بعض الدرجات الحرارية القياسية المذكورة في الجدول (2-1).

وبالرغم من أن محرار مقاومة سلك البلاتين يعطي قياسات حرارية مضبوطة الا أنه نادراً ما يستخدم في الصناعة وذلك لكبر حجمه اولاً ولأنه قابل للكسر من الناحية الثانية. هذا اضافة الى أن خواص السلك تتأثر بفعل الغازات المختزلة في جو الفرن حيث انها قد تذوب في السلك. ولذلك فهو يستخدم بالأساس في أجهزة قياسية لمعايرة أجهزة قياس درجات الحرارة الأخرى.

## ٨-٢ متحسسات الحرارة (الثرميستور): Theremistores

وهي نوع معين من المقاومات الكهربائية والتي تستحق شرحاً خاصاً بها. وهي على أنواع وأشكال مختلفة، الشكل (2-2).

فالثرميستور مقاومة كهربائية حساسة لدرجات الحرارة لأنها يمكن ان تكشف التغييرات الطفيفة في درجات الحرارة، حيث تستخدم في كثير من الأحيان كمفاتيح أمان (Safty switches). جاء استخدام الثرميستور بصوره واسعة في الدوائر الالكترونية في أجهزة التبريد والتدفئة، اشتق اسم الثرميستور من الكلمتين المقاومة

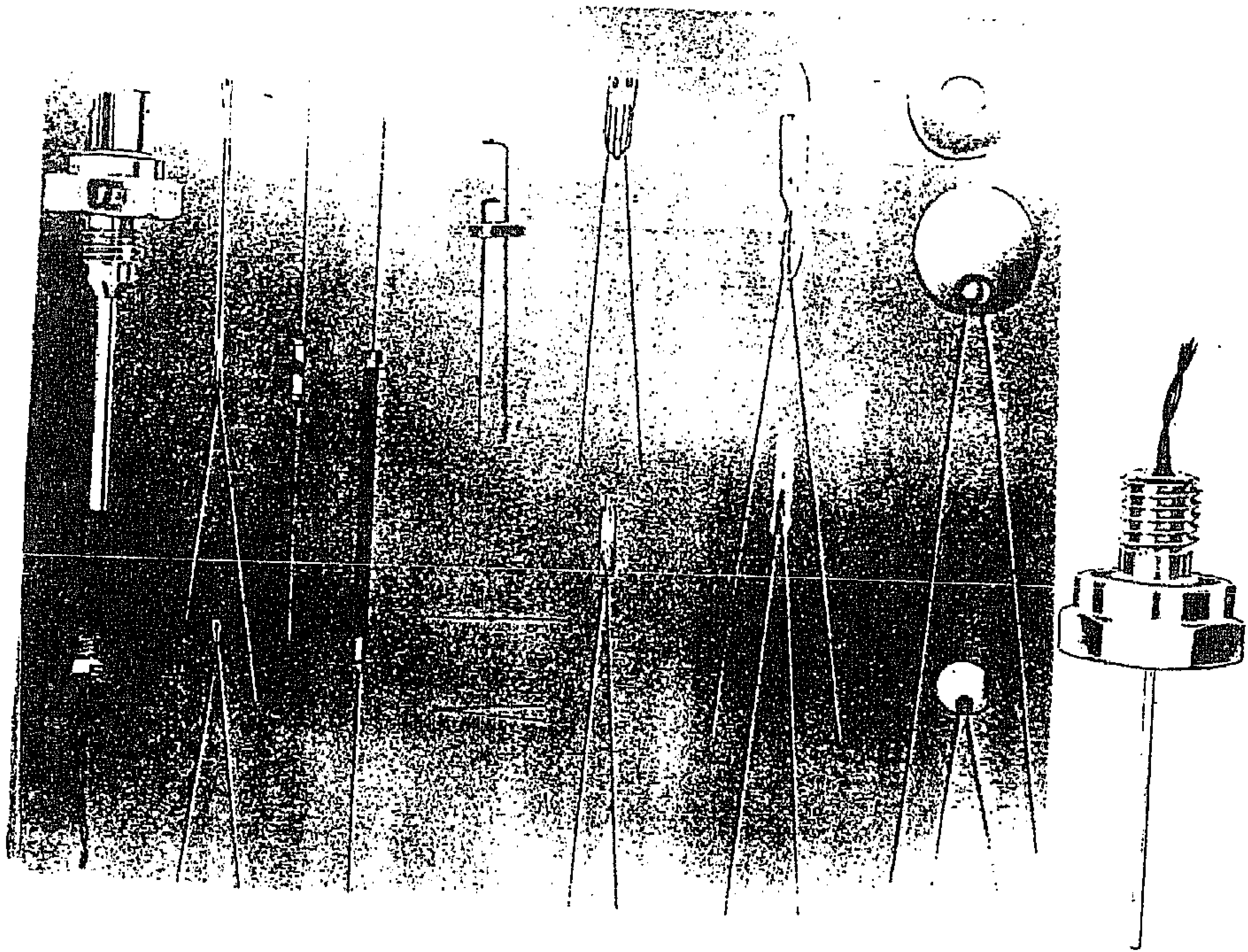
الحرارية THERMally resISTOR أي جزء من بداية كلمة الحرارية وجزء من نهاية كلمة مقاومة فصارت (Thermistor) .

تختلف أغلب الثرميستورات عن المقاومة الكهربائية المألوفة بكيفية تفاعلها مع تغيّر درجات الحرارة. فالمقاومة الكهربائية تبتدئ بالسخونة عندما تبدأ الالكترونات بالجريان في الدائرة .وعندما ترتفع درجة الحرارة، تزداد المقاومة لتقلل من مقدار الالكترونات المتحركة بحيث أنها يمكن أن تبرد الى حدٍ ما. وعلى النقيض من ذلك فإن الثرميستور لها تفاعل معاكس ، فعندما ترتفع درجة الحرارة فالمقاومة ستنخفض. وكما ذكر للتو فإن غالبية الثرميستور تتفاعل بهذه الطريقة، أما الباقي منها فتتصرف تماماً مثل المقاومات الكهربائية الاعتيادية.

هناك في الواقع نوعين مختلفين من الثرميستور هما النوع الذي له معامل درجة حرارة سالب (NTC) (negative temperature coefficient) ونوع له معامل درجة حرارة موجب (PTC) (Positive temperature coefficient). تقل مقاومة النوع (NTC) كلما زادت درجة الحرارة. أما النوع (PTC) فتصرفه يشبه تصرف المقاومات المألوفة اي تزداد مقاومته مع ازدياد درجة الحرارة.

وحيث ان الثيرميستورات لها هذه القابلية الخاصة للتفاعل مع تغير درجة الحرارة فهي تستخدم لقياس درجات الحرارة و للمحافظة على المحركات الكهربائية (Electric motors) من الإفراط في التسخين ولتحسس مستويات السوائل او تستخدم كمفاتيح امان في منبهات انذار الحريق او التجمد (Fire or Frost alarm) . ان تطبيقات انذار التجمد مهم جداً للذين يعنون بخطر التجمد على الفواكه والخضر. فإن التجمد القاتل يمكن ان يتلف ما قيمته الآلاف من الدنانير من الطعام في مدى ليله واحدة فقط. تستخدم الثرميستور لان لها القدرة على كشف الفروقات الطفيفة في درجات الحرارة.

للثرميستور نهايتين (قطبين) الشكل (3-2) في اغلب الحالات بحيث يمكن ربطها في الدائرة بنفس طريقة ربط المقاومات الكهربائية.



**الشكل 2-2:**

أنواع وأشكال مختلفة من الثرميستور. وبما انها تتحسس التغير الطفيف في درجة الحرارة. فتستخدم في احيان كثيرة كمفاتيح امان (Safty switches)

**الشكل 2-3:**

للثرميستور بصورة عامة نهايتين او قطبيين للإستخدام في ربط هذا النوع من المقاومة في الدائرة.

## ٩-٢ أجهزة القياس الكهربائية الحرارية Thermoelectric pyrometers

عند ربط سلكين مختلفين في التكوين الكيماوي الى بعضهما من طرف واحد وأبقاء الطرفين الآخرين حرّين (منفصلين) فعند تسخين نقطة الربط (النقطة الحارة (hot junctionالى درجة اعلى من الطرفين الحرين (النقطة الباردة cold junction) فإن قوة دافعة كهربائية (electromotive force "emf") سوف تتولد في الدائرة اي عند الطرفين الحرين . تعرف هذه الظاهرة بظاهرة بيلتر – تومسن - Peltier) (Thomson effect . ويمكن قياس القوة الدافعة الكهربائية المتكونة بسبب الفرق بين درجتي حرارة النقطة الباردة والنقطة الحارة بأي جهاز حساس لفروق الجهد القليلة. فعند ربط ميلي فولتميتر حساس (Sensitive millivoltmeter) ، مثلاً الى الطرفين المنفصلين (النقطة الباردة) يمكن تعيين القوة الدافعة الكهربائية (emf) المتولدة. وقد وجدان القوة الدافعة الكهربائية تزداد بزيادة الفرق بين درجتي حرارة النقطة الحارة والنقطة الباردة وعلى الصورة الرياضية التالية:

$$emf = a + bt + ct^2 + \ldots \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots (5\text{-}2)$$

حيث تمثل:

emf القوة الدافعة الكهربائية، t، درجة الحرارة عندما تكون درجة النقطة الباردة صفراً. a و b و c ثوابت خاصة بمعدني السلكين المستخدمين.

يمكن استخراج قيم الثوابت الثلاثة a و b و c باستخدام درجات حرارة قياسية كالتي في الجدول (2 -1) وتطبيق المعادلة (2 -5) لثلاث درجات ومن ثم استخراج قيم الثوابت الخاصة بذيتك السلكين. يدعى هذا الجهاز بالمزدوج الحراري (Thermo-couple) وهو الاساس لأغلب أجهزة قياس درجات الحرارة المستخدمة في الصناعة.

ان أهم أجزاء المزدوج الحراري هي:

أ- سلكان غير متشابهان كيماوياً إلا أن لهما تكوين كيماوي ملائم ومتجانس وذلك لتوليد قوة دافعة كهربائية كبيرة نسبياً بحيث يمكن التحسس بها بسهولة كما يمكن استخدامها لقياس اعلى درجة حرارية مطلوبة من دون ان ينصهرأو يتأكسد أحدهما او كليهما او تتقلب القوة الدافعة الكهربائية المتولدة.

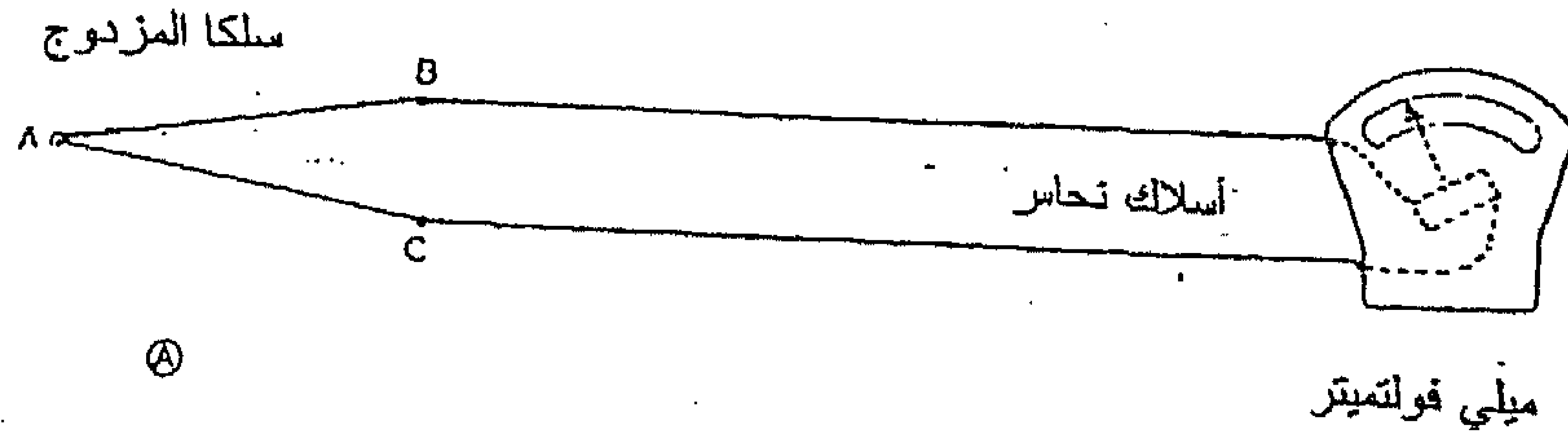
ب- مادة عازلة مقاومة لدرجات الحرارة العالية، وذلك لعزل السلكين عن بعضهما عدا عند النقطة الحارة بالطبع.

جـ- غلاف مقاوم لدرجات الحرارة العالية لحماية السلكين من التآكل الكيماوي و التفاعل مع الغازات الحارة.

د- ميلي فولتميتر ملائم او مقياس الجهد.

ان معظم اسلاك المزدوجات الحرارية غالية نسبياً وحيث أن من الضروري في الغالب وضع الميلي فولتميتر بعيداً الى حدٍ ما عن الفرن، المراد قياس درجة حرارته، لذلك كان لزاماً علينا ان نوصل سلكي المزدوج مع الميلي فولتميتر بوساطة أسلاك توصيل أرخص ثمناً. ولو فرض انه تم ربط الطرفين المنفصلين (B,C) بسلكين نحاسيين ليربطا الى الميلي فولتميتر الشكل (2-4). وحيث ان (B,C) قريبتان من الفرن عادة فإنهما سيكونان نقطتا ربط بين سلكين مختلفين في التكوين الكيماوي ولذا سوف يمثلان نقطتان لمزدوجين حراريين جديدين اي انه ستتولد قوة دافعة كهربائية على كل منهما. وبناء على ذلك فإن الميلي فولتميتر سوف يقيس مقدار الجهد الاجمالي وليس القوة الدافعة الكهربائية للنقطة الحارة A فقط. وحيث ان درجة الحرارة للنقطتين(B,C) القريبتين من الفرن قد تتغير بصورة ملحوظة، اي

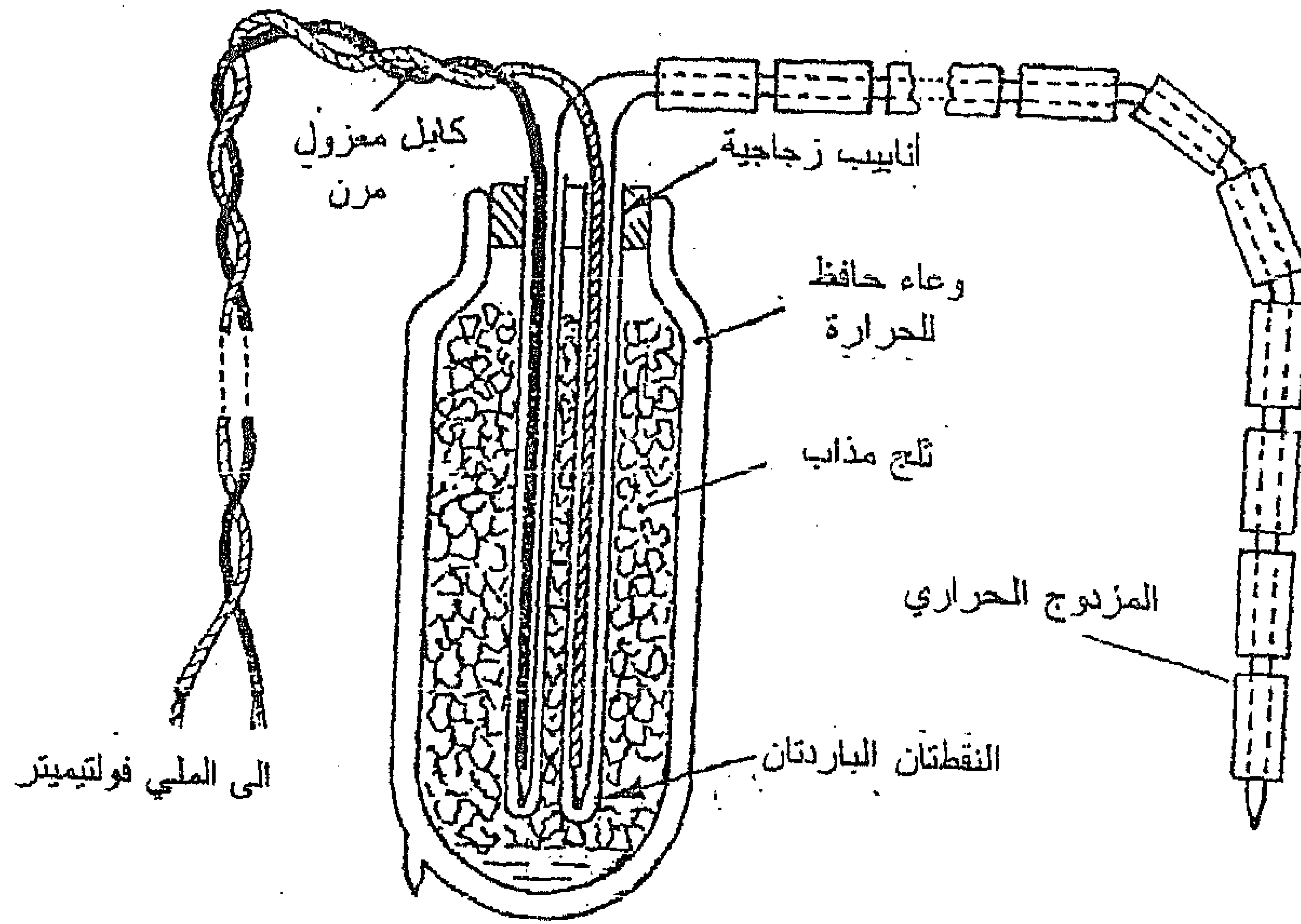
تتولد قوة دافعة كهربائية متغيرة نتيجة لذلك، ولذا تتغير القوة الدافعة الكهربائية او الاجمالية للدائرة . تؤدي هذه التأثيرات الى أخطاء غير معروفة في درجة الحرارة المسجلة.




الشكل (2-4) المزدوج الحراري مربوط من طرفي النقطة الباردة B و C بالملي فولتميتر بسلكين من النحاس.

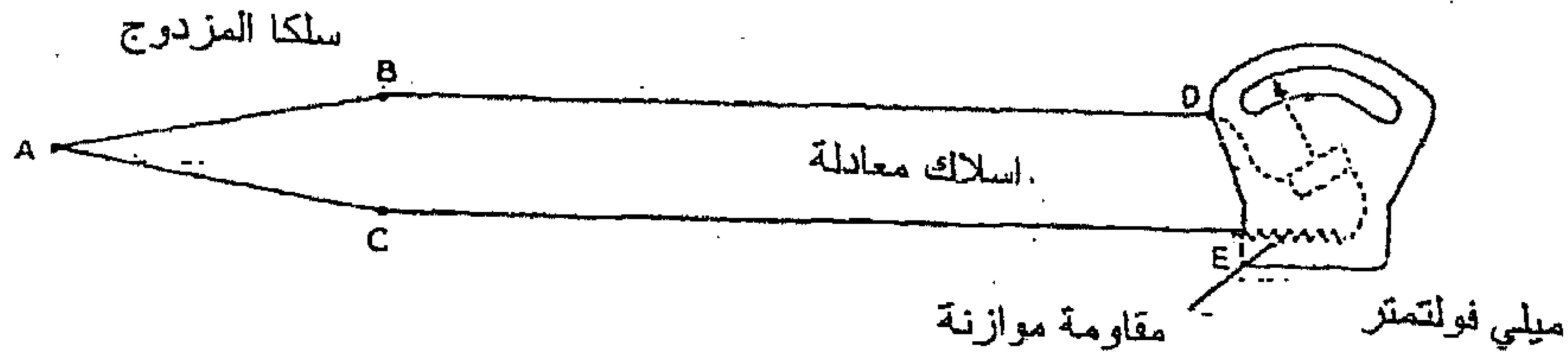
يمكن التغلب على التأثيرات المتغيرة للنقطتين B و C بطريقتين:

١- يتم جعل درجة حرارة النقطتين B و C ثابتة سواء خلال معايرة المزدوج الحراري اواستخدامه. ويمكن تحقيق ذلك في المختبر بسهولة وذلك بغمر النقطتين في وعاء حافظ للحرارة (ترمس) يحتوي على مزيج من ثلج وماء مقطر، الشكل (2-5). وبذلك انطبق اصطلاح النقاط الباردة B و C . وليس من الملائم في الواقع تطبيق هذا الشيء في الصناعة وبدلاً من ذلك يُصار الى طمر النقطتين B و C الى عمق أوطء من 3m تحت الأرض حيث تكون درجة الحرارة في باطن الأرض ثابتة على مدار السنة، إلا أن هذه الطريقة مكلفة حيث تتطلب ثلاثة امتار اضافية او أكثر من أسلاك المزدوج الحراري.




الشكل (2-5) طريقة لضمان ثبوت درجة حرارة النقطة الباردة لمزدوج حراري في المختبر

٢- باستخدام اسلاك توصيل معادلة (Compensating Leads) ، فهناك أسلاك تستخدم كأزواج حيث ان لها ثوابت كهروحرارية (Thermoelectrical constants) مشابهة لثوابت أسلاك المزدوج الحراري نفسه .ويكون أحد الأسلاك من النحاس عادةً أما الآخر فمن سبيكة ملائمة من النحاس والنيكل والتي تولد عند استخدامها مع سلك النحاس قوة دافعة كهربائية مشابهة لما للمزدوج نفسه عند مدى درجات الحرارة الواطئة التي تقع ضمنها درجات حرارة النقطتين الباردتين. وبشرط ان تكون النقطتين B و C متقاربتين ومن ثم يقعان عند نفس درجة الحرارة، فالجهد الكهروحراري الناتج سوف ينتقل الآن الى النقطتين D و E ، الشكل (2-6) ، حيث تربط الاسلاك المعادلة الى قطبي الملي فولتميتر.




الشكل (6-2) استخدام اسلاك التوصيل المعادلة

هناك مصدر آخر للخطأ ناتج عن تغيّر مقاومة الاسلاك المعادلة مع تغيّر درجة الحرارة، وأن كان هذا التغيير قليلاً في الواقع خصوصاً إذا كانت الاسلاك طويلة. يمكن التغلب على هذا الخطأ باستخدام مقاومة موازنة (ballast resistance) في الملي فولتميتر بحيث تصنع مقاومة الموازنة هذه من بعض السبائك التي معامل حرارة المقاومة لها اوطء، على سبيل المثال، سبيكة المنغانين (manganin) وهي سبيكة من النحاس والمنغنيز والنيكل.

يمكن ان تكون أسلاك المزدوجات الحرارية اما من المعادن الاساسية او المعادن النبيلة النادرة وحسب التطبيقات المطلوبة. تكون أسلاك المعادن الأساسية رخيصة بحيث يمكن استخدام اسلاك سميكة وقوية. وتكون أكثر حساسية أيضاً لكنها محدودة الاستخدام والى حد 1200 C. أما عند درجات الحرارة العالية فيلزم استخدام اسلاك من البلاتين وسبائكه. يجب حفظ هذه الاسلاك من تأثيرات اجواء الافران الضارة وذلك باحاطتها بالطين الحراري او السليكا النقية.

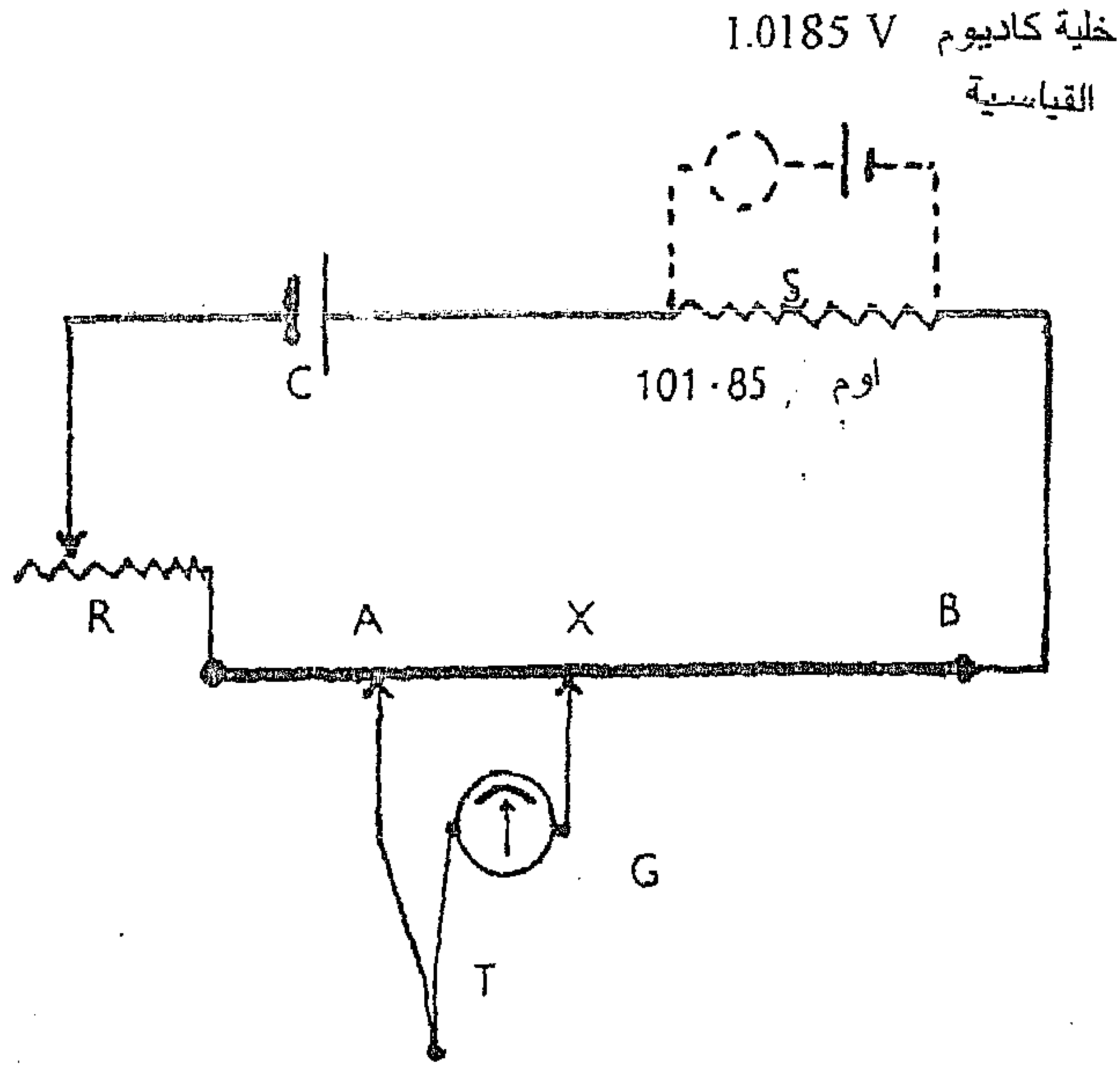
يبين الجدول (2-2) خواص المزدوجات الحرارية المألوفة

| نوع المزدوج | التكوين الكيماوي | | الحساسية mv/°C | مدى درجة الحرارة (°C) | اعظم درجة حرارة (°C) |
|---|---|---|---|---|---|
| نحاس / كونستنتان | Cu | كونستنتان 60%Cu 40% Ni | 0.054 | 300 الى -200 | 600 |
| حديد / كونستنتان | Fe | = | 0.054 | 750 الى -200 | 1000 |
| كروميل / الوميل | كروميل 90%Ni 10%Cr | الوميل 95%Ni 2%Al 3%Mn | 0.041 | 1200 الى -200 | 1350 |
| البلاتين / سبيكة بلاتين روديوم | Pt | بلاتين- روديوم 90%Pt 10%Rh | 0.0095 | 1450 الى الصفر | 1700 |
| بلاتين- روديوم / بلاتين روديوم | 80%Pt 20%Rh | 60%Pt 40%Rh | 0.0035 | 1600 الى الصفر | 1800 |
| تنكستن / مولوبدنوم | W | Mo | 0.008 | 1750 الى الصفر | 2000 |

يمكن أن يكون الملي فولتميتر من النوع الاعتيادي الذي يقيس فرق الجهد مباشرة ومنه يمكن معرفة مقدار درجة الحرارة بالرجوع الى الجدول الخاص بذلك المزدوج الحراري المستخدم. أو قد يقرأ الجهاز درجات الحرارة مباشرة وذلك باستخدام مقاومة معينة ترتبط داخل جهاز الملي فولتميتر لتغيير قراءات فرق الجهد (mV) الى ما يكافئها من درجات حرارية مباشرة. وفي هذه الحالة يكون لكل نوع من أنواع المزدوجات الحرارية جهاز خاص به لقراءة درجة الحرارة المباشرة حيث لايمكن استخدامه مع نوع آخر من المزدوجات الحرارية.

أما مقياس الجهد (potentiometer) فيقدم طريقةً أدق لقياس القوة الدافعة الكهربائية. تعتمد هذه الطريقة في القياس على مقابلة القوة الدافعة الكهربائية المتولدة على طرفي المزدوج الحراري بقوة دافعة معاكسة ليتم التعادل.

يتكون مقياس الجهد اساساً من عدد من ملفات المقاومة (B-A) الشكل (2-7) يمر خلالها تيار ثابت من البطارية (C). تتم المحافظة على ثبوت هذا التيار حيث يتم ضبطه أحياناً بوساطة المقاومة المتغيرة R، بحيث ان الانخفاض في الجهد خلال المقاومة الثابتةS ، يعادل القوة الدافعة الكهربائية لخلية الكادميوم القياسية Stan-dard Cadimium cell) (1.0185V) عند (15 C). وحيث ان الانخفاض في الجهد ، في الدائرة الكهربائية البسيطة يتناسب مع المقاومة ، فالقوة الدافعة الكهربائية المجهولة يمكن أن تقاس بتعادلها ضد الهبوط في الجهد الحاصل عند مقاومة مناسبة معلومة . يتم ربط احد طرفي النقطة الباردة للمزدوج الى النقطة (A) والطرف الآخر الى الكلفانوميتر ومنه الى نقطة ملائمة(X) عبر مفتاح منزلق. يشير الكلفانوميتر الى الصفر عندما تحصل (نصل الى ) نقطة التعادل، يدعى هذا الترتيب بطريقة نقطة الخمود (null).



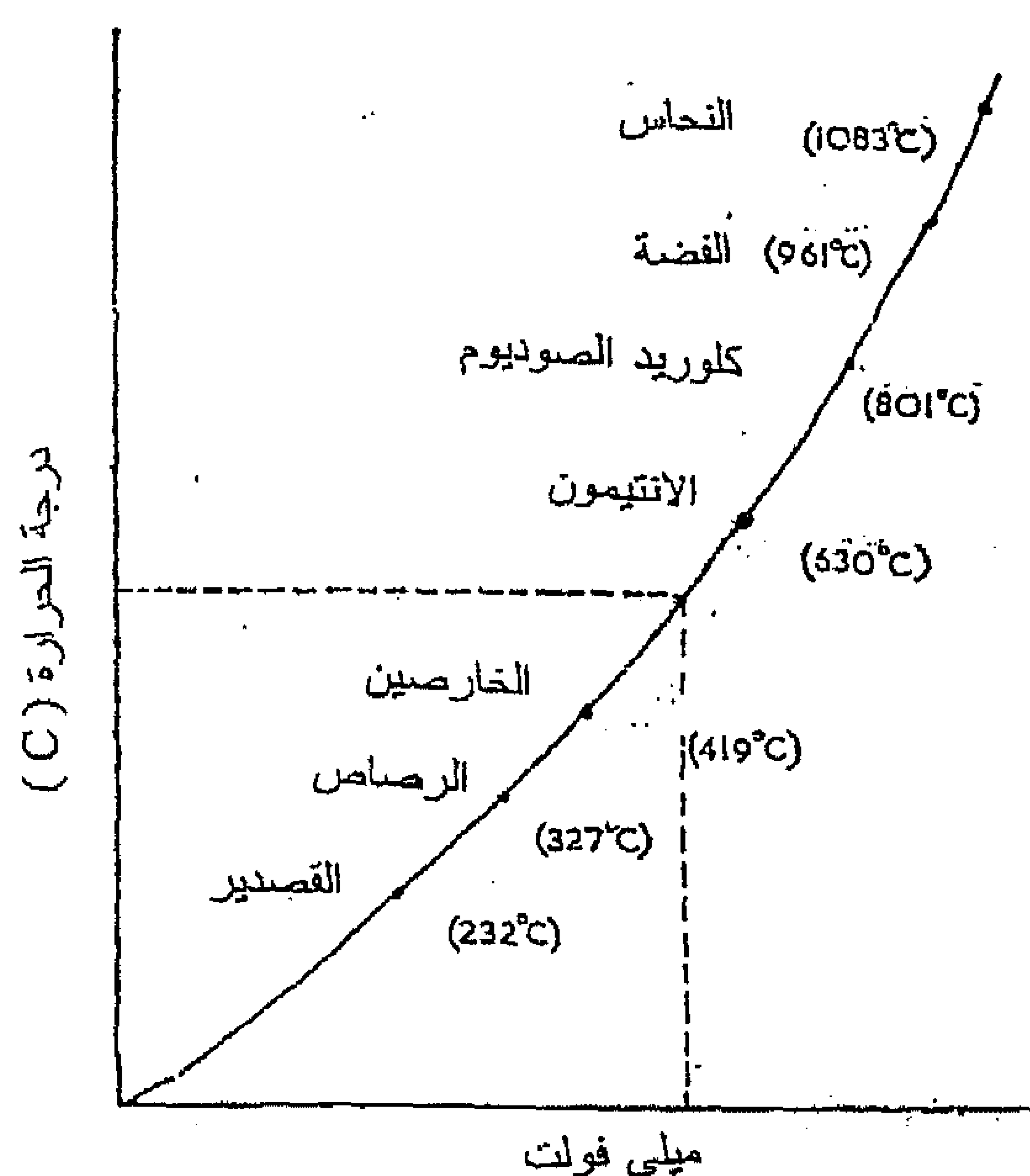

الشكل (2-7) مقياس الجهد .

## معايرة وضبط المزدوج الحراري:

يجب ان يتم تعيير وضبط المزدوج الذي سيربط في الدائرة ويستعمل فعلاً وباستخدام اسلاك توصيل معادلة حيث قد ذكرنا ان القوة الدافعة الكهربائية المتولدة من قبل المزدوج نفسه لاتكون مساوية للقوة الدافعة الكهربائية المقاسة من قبل الملي فولتميتر.

يمكن ضبط المزدوج مقابل مزدوج قياس خاص وإذا لم يتوفر فيمكن معايرته (ضبطه) باستخدام النقاط القياسية ، على سبيل المثال نقاط انصهار المعادن النقية كما مرّ ذكره. وذلك من منحنيات التبريد الخاصة بكل معدن بعد رسمه من قراءات

الملي فولتميتر والزمن في حالة المعدن النقي السائل تحت ظروف الاتزان. يتم الحصول على سلسلة من قراءات الملي فولتميتر المقابلة لنقاط انصهار العديد من المعادن المنصهرة. يمكن الآن رسم منحنى بين درجات حرارة الانصهار وقراءات الملي فولتميتر المقابلة لها كما في شكل (2-8) والذي يمثل منحنى معايرة المزدوج الحراري المستخدم.




**شكل (2-8) منحنى معايرة كامل لمزدوج حراري والذي رسمت فيه نقاط انجماد المواد المستخدمة ضد القراءات بالملي فولت (mV) المقابلة لنفس نقاط الانجماد.**

## ١٠-٢ أجهزة قياس درجات الحرارة الشعاعية (بايروميتر)
## Radiation Pyrometers

من الضروري في بعض الاحيان قياس درجات حرارية عالية فوق مدى المزدوجات الحرارية الاعتيادية او قياس درجة حرارة سطح من النوع الذي لايمكن أو لا يتلائم وضع جهاز القياس عليه مباشرة ، كأن يكون متحركاً، على سبيل المثال، كما في حالة دحو الفولاذ على الحار. يلزم الامر في مثل هذه الاحوال استخدام جهاز قياس درجات الحرارة ولايتطلب ان يكون في حالة تماسٍ مباشر مع الجسم الحار، لكنه يقيس شدة الحرارة المشعة من هذا السطح. ولأجل القيام بذلك يجب ان تسود ظروف الجسم الاسود عند السطح المشع، يمكن تعريف الجسم الاسود بأنه الجسم الذي يمتص كل الأشعة الساقطة عليه من دون ان يفقد جزءً منها بالإنعكاس. وبالعكس فهذا الجسم سوف يشع الحرارة بنفس الطريقة. تقترب الى مدى كبير الاشعة المستلمة من الداخل اللافح للفرن المغلق بشكل تام من ظروف الجسم الأسود المثالي. وحيث ان درجة حرارة الهواء الجوي المحيط هي أقل من درجة حرارة الجسم الحار، فتمثل الطاقة الحرارية المستلمة من الجسم والمنبعثة بصورة طليقة الى الخارج جزء من الطاقة اذا كانت الظروف السائدة هي ظروف الجسم الاسود المثالي. يتم تعريف الانبعاثية (emissivity) لسطح ما بأنها نسبة الطاقة الحرارية المنبعثة (المشعة) من قبل السطح الى الطاقة الحرارية المنبعثة من سطح الجسم الاسود عند نفس درجة الحرارة.

يعتمد مقدار الانبعاثية على طبيعة المادة ودرجة حرارة السطح إضافة الى لونه. تقترب السطوح الخشنة، على سبيل المثال، إلى ظروف الجسم الأسود أكثر من السطوح الملساء بغض النظر عن لونها. يبين الجدول (2-3) قيم الانبعاثية لسطوح بعض المواد.

جدول (2-3) الانبعاثية الكلية لسطوح بعض المواد.

| المـــــادة | الإنبعاثية emissivity |
|---|---|
| نحاس (غير متأكسد) | 0.02 |
| نحاس (متأكسد) | 0.70 |
| نحاس (سائل) | 0.15 |
| حديد (غير متأكسد) | 0.05 |
| حديد (متأكسد) | 0.85 |
| فولاذ الواح (خشن ومتأكسد) | 0.97 |
| حديد الزهر (متأكسد بشدة) | 0.95 |
| طابوق ناري | 0.75 |
| طابوق السليكا | 0.85 |

مع ملاحظة ان القيم اعلاه تقريبية وتعتمد على درجة الحرارة وخشونة السطح.

يتناسب مجموع الطاقة الحرارية المنبعثة من الجسم مع درجة الحرارة المطلقة مرفوعة للأس اربعة. ويدعى هذا بقانون ستيفان– بولتزمان (Stefan -Boltzman law) ويمكن التعبير عنه بالآتي:

$$E = Z (T^4 - T_o^4) \qquad \text{.................(6-2)}$$

حيث تمثل E مجموع الطاقة الحرارية المنبعثة

Z ثابت .

$T$ درجة حرارة السطح المشع المطلقة

$T_o$ درجة حرارة الهواء المحيط بجهاز قياس درجة الحرارة

وتكون $T_o$ صغيرة عادة مقارنة بدرجات حرارة العمليات الميتالورجية ولذا يمكن تبسيط القانون اعلاه بالآتي:

$$E = Z T^4 \qquad \text{..................(7-2)}$$

وحيث ان الطاقة المنبعثة تزداد عند ارتفاع درجة الحرارة أكثر بكثير من ارتفاع درجة الحرارة النسبي لذلك تكون أجهزة قياس درجات الحرارة الشعاعية أكثر حساسية عندالدرجات الحرارية العالية. وعند معرفة معامل الانبعاثية (e) للسطح المشع يمكن اجراء التصحيح الخاص بالأجسام المشعة في مكان مفتوح وعليه يكون

$$E = Ze\, T^4 \qquad \text{..................(8-2)}$$

حيث تمثل T درجة الحرارة المطلقة الحقيقية. فإذا فرض ان الدرجة الظاهرية التي تتم قرائتها هي (S) عندئذ تكون

$$E = ZS^4 \qquad \text{..................(9-2)}$$

أي أن:

$$ZeT^4 = ZS^4$$

$$eT^4 = S^4 \qquad \text{.......................(10-2)}$$

مثال:

افرض ان درجة الحرارة الظاهرية (الملاحظة) لسطح مطلي باوكسيد النحاس والذي يشع في الهواء (مكان مفتوح) هي 800 C. فإذا علم ان معامل الانبعاثية لاوكسيد النحاس 0.70، احسب درجة الحرارة الحقيقية (T).

الحل: بما أن

$$eT^4= S^4$$

$$0.7 \times T^4 = (800+273)^4$$

$$Logo\ 0.7+4\ Log\ T =4\ Log\ 1073$$

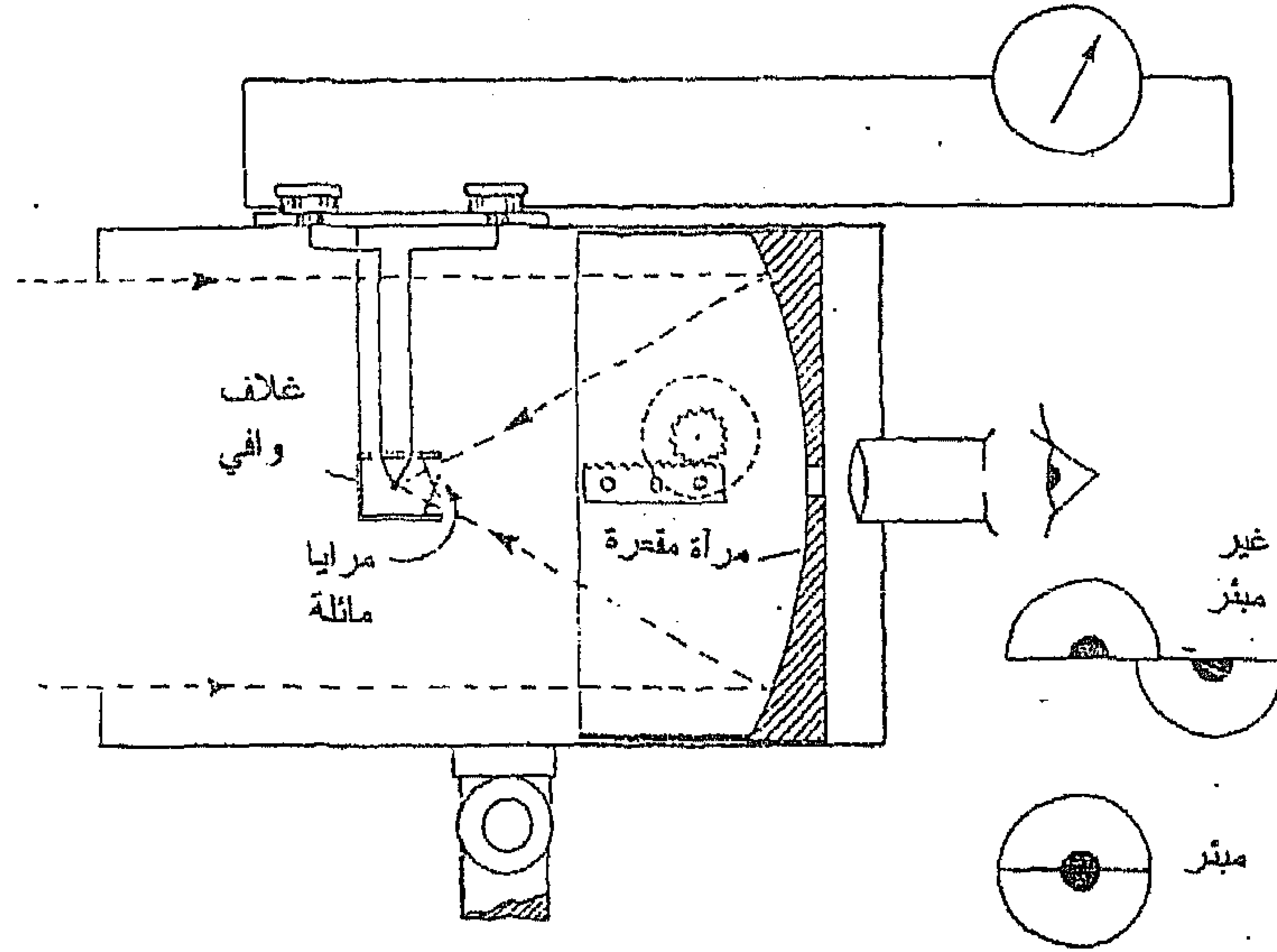
$$T=1173K \text{ or } 900\ C$$

يتم ضبط معظم أجهزة قياس درجات الحرارة الشعاعية لتلائم مدى درجات حراريه بين $700\ C^{\circ}$ و$2000\ C^{\circ}$ حيث يتضمن نوع من أنظمة التبئير (focusing) الضوئى لتركيز الاشعة الحرارية على المزدوج الحراري. لايعتمد مثل هذه الاجهزة على المسافة بين الجهاز ومصدر الحرارة بشرط ان تملأ صورة الجسم الحار كامل مجال الرؤية للعدسة العينيه. يمكن ان تكون هناك بعض الاخطاء في القراءة نتيجة لتواجد دخان اللهب او بخار الماء في جو الفرن ولذلك يجب مراعاة ذلك كالإنتظار لحين زوال الدخان او غيره.

يبين الشكل (2-9) رسماً تخطيطياً لجهاز قياس درجة الحرارة الشعاعي. وهو يتألف بالأساس من مرآة مقعرة يمكن تحريكها بحيث تركز الاشعة الحرارية على المزدوج الحراري الصغير المثبت داخل الجهاز . يتم التبئير بضبط مكان المرآة حتى يتطابق نصفي الصورة (الدائرة) تماماً كما في الشكل (2-9) . يتم عزل المزدوج عن الاشعة الساقطة عليه مباشرة بغلاف صغير ملائم عادة. تستبدل المرآة في بعض الأجهزة بعدسة محدبه لتركيز الاشعة الساقطة كما في حالة أجهزة الخلايا الشمسية لقياس درجات الحرارة.

## ٢-١١ أجهزة قياس درجات الحرارة الضوئية Optical Pyrometers

تقع ضمن هذه التسمية عدد من الاجهزة المعقدة لقياس درجة الحرارة ولعل أبسطها تلك التي تحتوي على مرشحات متدرجه التلوين والتي مـن خلالها تتـم




الشكل (2-9) أساس جهاز قياس درجة الحرارة الشعاعي لفيري (Fery).

مشاهدة الجسم الحار. يلاحظ التدرج (المقياس) في الحالة التي عندها لايمكن تمييز اللون. تقاس شدة الضوء أساساً في هذه الاجهزة والتي هي انعكاس لدرجة حرارية معينة. والقاعدة في هذه الاجهزة تعتمد على قانون وين (Wien's Law)الذي يمكن التعبير عنه بالآتي:

$$I = C\lambda^{-5} . e^{-\frac{k}{\lambda T}} \qquad ..................(2-11)$$

حيث تمثل I شدة الأشعة المنبعثة من الجسم وλ طولها الموجي و T درجة حرارة الجسم المطلقة و Cو k ثابتان و e هي أساس اللوغاريتم الطبيعي. وإذا لم تكن ظروف الجسم الاسود سائده فتكون العلاقة

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{S} = \frac{\lambda \log E}{6232} \qquad .................... (12-2)$$

حيث ان S هي درجة الحرارة الظاهرية و (E) الانبعاثية للمادة غير الشفافة وللطول الموجي (λ) .

أ- جهاز وانر لقياس درجة الحرارة Wanner Pyrometer

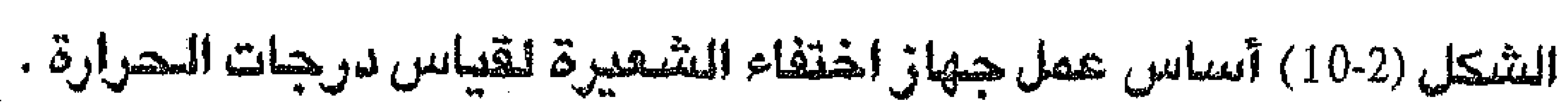
تم في جهاز وانر لقياس درجات الحرارة استخدام مستقطب الضوء حيث تتم المقارنة فيه مع مصباح كهربائي معاير الشدة مسبقاً. وعند النظر من خلال العدسة العينية فسيرى مجال دائري مقسوم الى نصفين، احدهما متعلق بالجسم الحار والنصف الثاني بالمصباح القياسي. يتم تدوير المستقطب (تغيير زاويته)حتى تتساوى أضاءة نصفا الدائرة عندئذٍ، تؤخذ قراءة درجة الحرارة.

ب- جهاز اختفاء الشعيرة لقياس درجة الحرارة

**Disappering - Filament Pyrometer.**

وهو من الاجهزة الضوئية المعروفة لقياس درجات الحرارة (الشكل2-10) .

يستخدم في هذا الجهاز مصباح كهربائي قياسي موضوع في مجال رؤية الجسم الحار. تتم إضاءة المصباح ويضبط التيار المار خلال شعيرته بوساطة مقاومة متغيره (Rheostat) حتى يتوافق لون الجسم الحار مع لون الشعيره تماماً بحيث لايمكن تمييز الشعيرة في مجال الرؤية اي أنها تختفي . تتم معايرة الاميتر (Ammeter) الموجود بحيث يقرأ درجات حرارية مئوية وبتدريجين احدهما في مدى ( 700-1500 C) والآخر (1200-2000 C) تقريباً.يتم ادخال مرشح متعادل بين الجسم الحاروالشعيرة لتخفيف شدة الاشعة الصادرة عن الجسم الحار، عندما لايفي التدريج المنخفض لقياس درجة حرارة الجسم العالية جداً وعند ذلك يتم استخدام التدريج الاعلى في القياس. يمكن استخدام مرشح آخر أحمر اللون عند العدسة العينية وذلك لإزالة اية فروق موجودة بين لويني الجسم الحار والشعيرة . تتأثر قراءة الجهاز بوجود الدخان واللهب وبخار الماء وغيرها ايضاً ولذلك يجب مراعاة ذلك. وإذا كان الجسم الحار لماعاً فقد تنعكس عليه اضواء من مصادر اخرى حيث يؤثر ذلك على قراءة درجة الحرارة فالمفروض الانتباه الى ذلك.




الشكل (2-10) أساس عمل جهاز اختفاء الشعيرة لقياس درجات الحرارة .

# تمارين الفصل الثاني

١- اذكر الأسس النظرية التي تعتمد عليها طرائق قياس درجات الحرارة مع الإشارة الى تطبيقاتها.

٢- صف الطريقة العملية التي يتم بها تعيين درجة حرارة الانجماد لنموذج من سبيكة Sn – Pb .

٣- اذكر الاعتبارات التي يجب ان تراعى عند اختيار طريقة جهاز قياس درجة حرارة (Pyrometer) ملائمة لتطبيق محدد.

٤- ناقش مايلي عند استخدام جهاز المزدوج الحراري.

أ- المشاكل العملية في قياس درجة حرارة معدن منصهر .

ب- ميزة مقياس الجهد (Potentiometer) على جهاز المللي فولتميتر في قياس القوة الدافعة الكهربائية.

جـ- طريقة المعايرة.

د- الغرض الاساس من استخدام اسلاك التوصيل المعادلة.

٥- اشرح معنى ظروف الجسم الاسود عند تطبيقها لمجموع الاشعة وأجهزة قياس درجات الحرارة الضوئية.

٦- صف جهاز قياس درجات الحرارة الضوئي او الشعاعي، مع ذكر الاحتياطات الواجب اتخاذها للحصول على دقه عالية.

٧- ناقش الطرائق الكهربائية المتوفرة والملائمة لقياس مدى من درجات الحرارة بين $300\text{-}1600\ C^{\circ}$

٨- ماهي المحددات عند استخدام المحرار الزئبقي في قياس درجة الحرارة ولماذا لم يكن ملائم لقياس درجة حرارة العمليات الميتالورجية.

# الفصل الثالث

# أساسيات علم البلورات

# Principles of Crystallography

## ١-٣ المقدمة

يمكن ان يتم تقسيم المواد بصورة عامة الى صنفين اساسيين ، فأما أن تكون المواد بلورية (crystalline) القوام كالماس وجميع المعادن في الحالة الاعتيادية واغلب المواد السيراميكية (الخزفيات) كالأكاسيد والكاربيدات والنتريدات وماشاكلها، أو تكون غير بلورية او لابلورية (noncrstalline or amorphous) كأغلب اللدائن (plastics) والزجاج وغيرها.

ان الغاية من التطرق الى أساسيات علم البلورات هنا هي مقدمة لدراسة حيود الاشعة السينية بواسطة البلورات. فيجب قبل دراسة حيود الاشعة السينية، تأمل هندسة وبنية البلورات وذلك لمعرفة كيف تعمل البلورات على حيود الاشعة السينية. يجب ايضاً دراسة الأنواع المختلفة من البلورات وكيفية تصنيفها الى عدد صغير نسبياً من المجموعات. وأخيراً دراسة كيفية تسمية وتحديد او تمثيل الاتجاهات والمستويات الذرية في البلورة وعلى هيئة رموز او رسوم.

ان موضوع البلورات علم واسع، لكنه سيتم التطرق في هذا الكتاب الى الماهيات البسيطة منه، على سبيل المثال كيفية ترتيب الذرات في بعض البلورات المألوفة وعلاقة هذا الترتيب بتحديد الطريقة التي يمكن للبلورة ان تحيد الاشعة السينية.

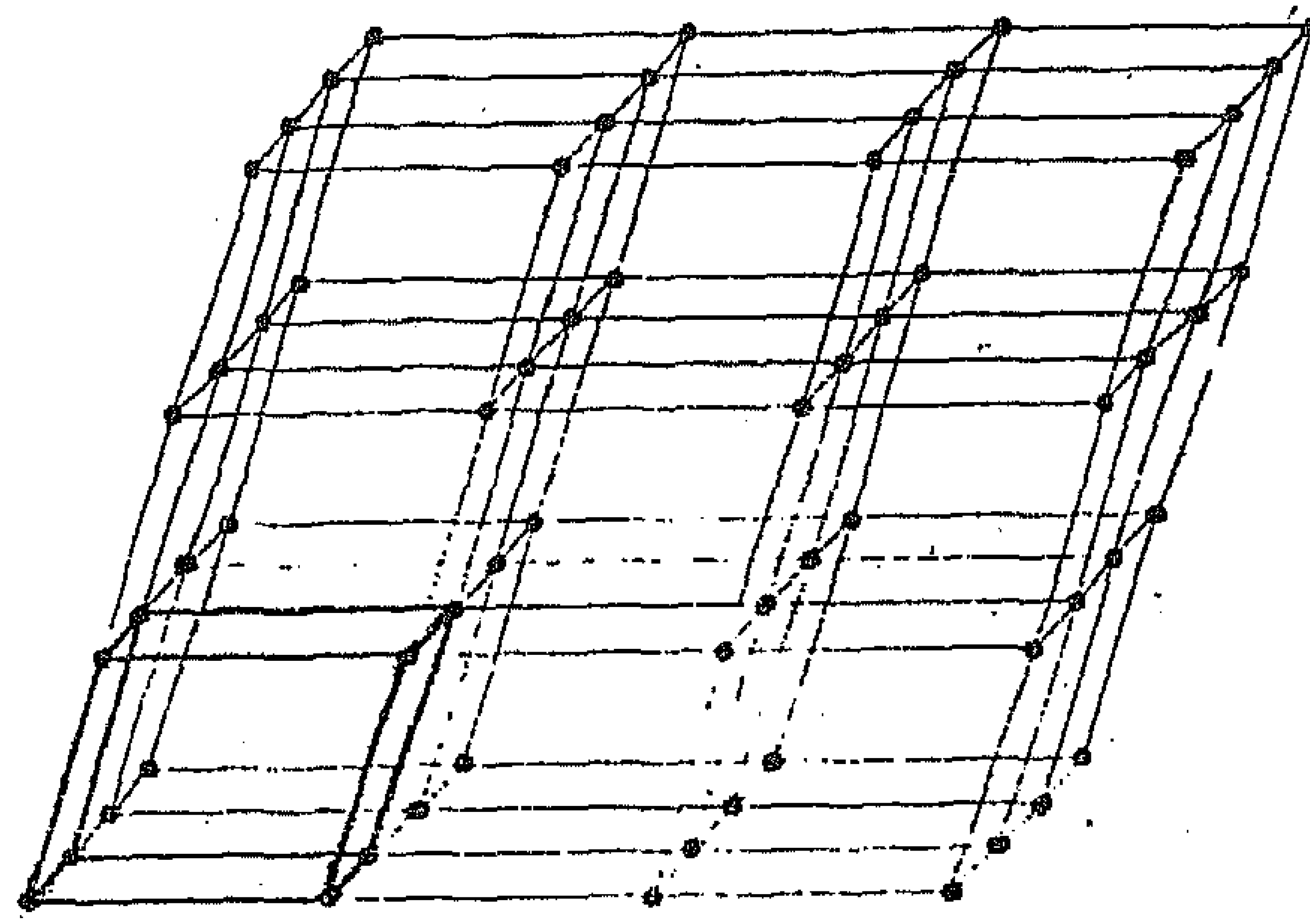
## ٢-٣ الشبكة البلورية Crystal lattice

يمكن تعريف البلورة بأنها جزء صلب مكون من ذرات مرتبة بانتظام و بنمط متكرر في الابعاد الثلاثة. ولذلك تفرق البلورات عن الغازات والسوائل بشكل رئيس لأن الترتيب الذري في الاخيرين لايمتلك المتطلب الرئيس وهو التكرار (تكرار الترتيب المنتظم). ليس كل المواد الصلبة بلورية حيث ان قسماً منها لابلوري، كما تقدم ذكره، كالزجاج فهي لاتمتلك اي ترتيب داخلي منتظم للذرات . وليس هناك فرق رئيسي بين المواد الصلبة غير البلورية والسوائل إلا أنه يُشار الى المواد الصلبة غير البلورية بأنها سوائل دون المبردة (under cooled) .

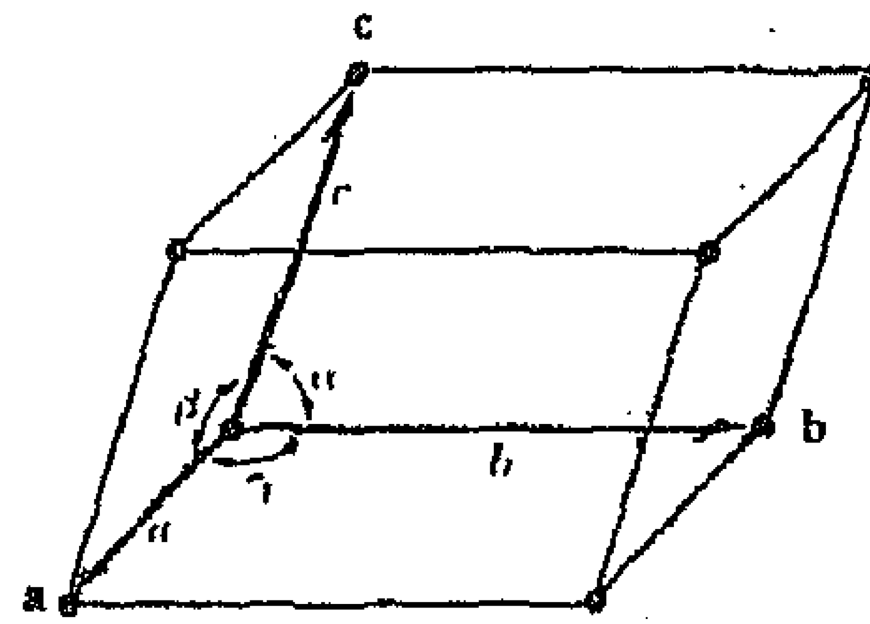
من المعتاد ، عند دراسة البلورات، اهمال الذرات الحقيقية التي تكوّن البلورة وكذلك الترتيب المتكرر في الفضاء، وبدلاً عن ذلك تتم دراسة مجموعة من النقاط الخيالية لها علاقة ثابتة في الفضاء مع ذرات البلورة والتي يمكن ان تعتبر العمود الفقري الذي تبنى على أساسه البلورة الحقيقية.

يتم تكوين مجموعة النقاط هذه كالآتي، لنتصور ان الفضاء مقسّم الى ثلاث مجموعات من المستويات تكون كل المستويات في المجموعة الواحدة متوازية ومتساوية البعد عن بعضها. يولد تقسيم الفضاء هذا مجموعة من الخلايا متناظرة في الحجم والشكل والاتجاه بالنسبة الى جاراتها. تكون كل خلية على شكل متوازي السطوح حيث ان كل وجهين متقابلين متوازيين فيكون كل وجه فيها متوازي اضلاع. تتقاطع السطوح المقسمة للفضاء فيما بينها في مجموعة من الخطوط (الشكل 3-1)، ومن ثم تتقاطع هذه الخطوط في مجموعة من النقاط هي تلك التي تمت الاشارة اليها سابقاً. لهذه النقاط المتكونة خاصية مهمة هي تكوينها للشبيكه النقطية والتي تعرّف بأنها صفوف من النقاط المنتظمة في الفضاء بحيث أن كل نقطة محاطه بترتيب من النقاط المتناظرة و المتماثلة. اي معنى ذلك أنه إذا نظر من نقطة شبيكه باتجاه معين فسيبدو المنظر نفسه تماماً إذا تم ا لنظر بنفس الاتجاه من اية نقطة شبيكة أخرى في الشبيكة النقطية (Point lattice).

وحيث ان كل الخلايا في الشبيكة المبينه في الشكل (3-1) متماثلة فيمكن اختيار اية واحدة منها وعلى سبيل المثال تلك المرسومة بخط غامق. كخلية أساسية (unit cell) . يمكن اذن وصف الخلية الاساسية بالمتجهات الثلاثة a و b و c المرسومة من احدى زوايا الخلية والتي تعتبر نقطة الاصل (الشكل 3-2). تحدد هذه المتجهات الخلية وتدعى المحاور البلورية للخلية. يمكن ايضاً وصف الخلايا بدلالة أضلاعها (a و b و c ) وبدلالة الزوايا التي بينها (α و β و γ). تدعى هذه الأطوال والزوايا بثوابت الشبيكة او معلمات الشبيكة (lattice Parameters) للخلية الاساس.



الشكل (3-1) شبيكة نقطية.




الشكل (3-2) خلية أساسية.

## ٣-٣ الأنظمة البلورية Crystal Systems

يمكن تكوين خلايا أساسية ذات أشكال مختلفة عند تقسيم الفضاء بثلاث مجاميع من المستويات بناء على كيفية ترتيب هذه المستويات. فعلى سبيل المثال إذا كانت المجموعات الثلاث من المستويات متباعدة عن بعضها بمسافات متساوية وكانت متعامدة على بعضها بنفس الوقت فالخلية الأساس ستكون مكعبة . فتكون ابعاد الخلية في هذه الحالة متساوية ومتعامدة على بعضها او أن

$\alpha = b = \gamma = 90^\circ$ و $a = b = c$ . وهكذا في بقية الانظمة فعند اعطاء قيم معينة لأطوال المحاور والزوايا ، يمكن انشاء خلايا أساسية مختلفة الشكل حيث ينتج عن ذلك مختلف الانوع من الشبيكات النقطية، لأن نقاط الشبيكة تقع على زوايا (أركان) الخلية. وكنتيجة لذلك يمكن إنشاء سبعة أنواع مختلفة من الخلايا لشمول جميع الشبيكات النقطية المكنة . أي أن هناك سبعة أنواع من الأنظمة البلورية التي يمكن تصنيف كل البلورات ضمنها. يبين الجدول(3-1) الأنظمة الأساسية الممكنة ومواصفاتها.

جدول (3-1)الأنظمة البلورية الأساسية وصفاتها.

| النظام | أطوال حرف الخلية و الزوايا | الشبيكة المشتقة او شبيكة برافس | المواد المتبلورة على هذا المنوال |
|---|---|---|---|
| – المكعب (cubic) | $a = b = c$<br>$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ | البسيط (S.C) والمتمركز الجسم (BCC) والمتمركز الوجه (F.C.C) | Cu , Ag, Au<br>Fe, Cr, Nacl |
| – رباعي الاضلاع (Tetragonal) | $a = b \neq c$<br>$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ | البسيط (S.T) والمتمركز الجسم (B.C.T) | $TiO_2$,<br>$\beta$-Sn |
| – المعيني او المتعامد الاضلاع orthorhombic | $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$<br>$a \neq b \neq c$ | البسيط(S.O)والمتمركز الجسم (B.C.O) والمتمركز القاعدة (base C.O.) والمتمركز الوجه (F.C.O) | $Fe_3C$ ,<br>$\alpha$-s,<br>Ga |
| – ثلاثي الاضلاع (Trigonal) أو (Rhombohedral) | $a = b = c$<br>$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ | بسيط فقط | As,Sb,Bi<br>والكالسايت<br>(Calcite) |
| – السداسي (Hexagonal) | $\alpha = \beta \neq 90^\circ$<br>$\gamma = 120^\circ$<br>$a = b \neq c$ | متراص (HCP) | Zn , Cd , Mg<br>NiAs |
| – احادي الميل (Monoclinic) | $a \neq b \neq c$<br>$\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$ | بسيط (S.M.) ومتمركز القاعدة (base C.M.) | $\beta$-S<br>$CaSO_4.2H_2O$<br>gypsumجبسوم |
| – ثلاثي الميل (Triclinic) | $a \neq b \neq c$<br>$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ | بسيط فقط . | $K_2Cr_2O_7$ |

اذن يمكن الحصول على سبعة شبيكات نقطية بوضع النقاط عندزوايا الخلايا الاساسية للأنظمة البلورية السبعة. وهناك ترتيبات اخرى للنقاط تغي بمتطلبات الشبكية النقطية ، والمقصود ان كل نقطة محاطه بأخريات متناظرة من حيث الوضع والحجم والشكل، وقد تبين ان هناك اربعة عشر شبيكة نقطية ممكنة فقط وقد سميت باسم العالم الالماني "Bravais" الذي استنتج ذلك "Bravais lattice" فعلى سبيل المثال اذا تم وضع نقطة في مركز كل خلية من خلايا الشبيكة النقطية المكعبة فالصفوف الجديدة للنقاط تشكل شبيكة نقطية ايضاً. وبالتشابه يمكن ان تتكون شبيكة نقطية اخرى من الخلية الاساسية المكعبة التي لها نقاط شبيكة عند كل زاوية وفي مركز كل وجه منها وتسمى عندئذ خلية المكعب المتمركز الوجه (FCC) .

يبين الجدول (3-1) والشكل (3-3) مواصفات اشكال شبيكات برافس (Bravais lattices) الاربعة عشر. تعود نقطة الشبيكة في داخل الخلية كلياً الى تلك الخلية، بينما تكون تلك التي في وجه الخلية مشتركة بين خليتين متجاورتين اما تلك التي في زاوية الخلية فمشتركة بين ثمانية خلايا، الا في الخلية السداسية فتكون مشتركة بين ست خلايا. ومن هذا يتضح ان عدد نقاط الشبيكة في الخلية الواحدة (عدا السداسية) هو الآتي:

$$N = Ni + \frac{Nf}{2} + \frac{Nc}{8} \qquad \text{(1-3)}$$

حيث تمثل :

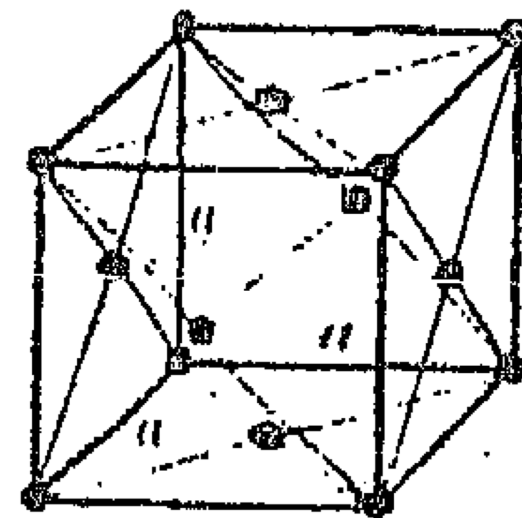
N: عدد النقاط الحقيقي العائد لتلك الخلية.

Ni: عدد النقاط في داخل الخلية.

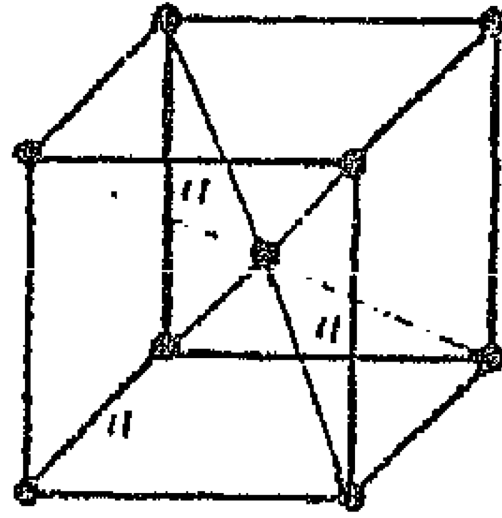
Nf: عدد النقاط في وجه الخلية.

Nc: عدد النقاط في زوايا (أركان) الخلية.

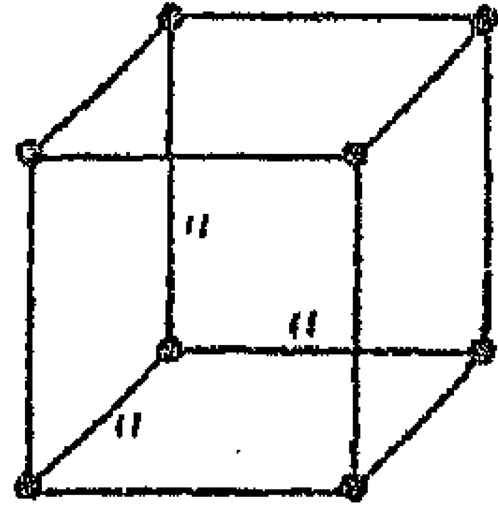
تسمى الخلية التي تحتوي على نقطة شبيكة واحدة فقط بالخلية الاولية (Primitive cell) بينما تدعى الخلية التي تحتوي على نقاط اضافية في الداخل او في الوجوه، غير الاولية (nonprimitive).



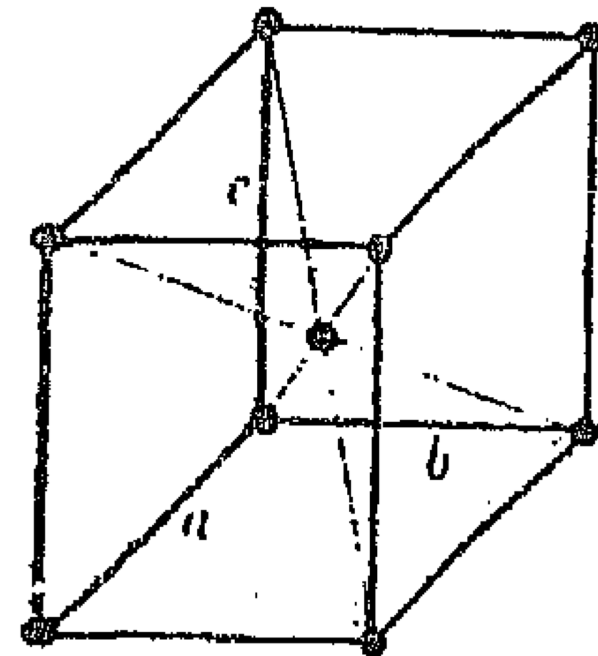
مكعب متمركز الوجه



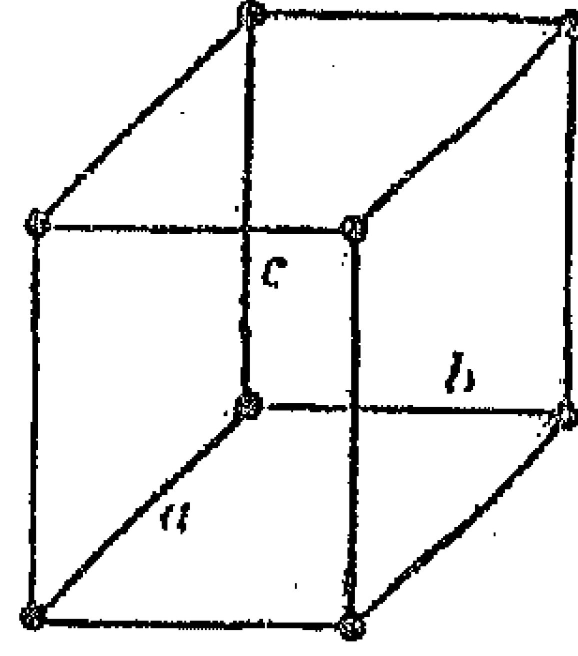
مكعب متمركز الجسم



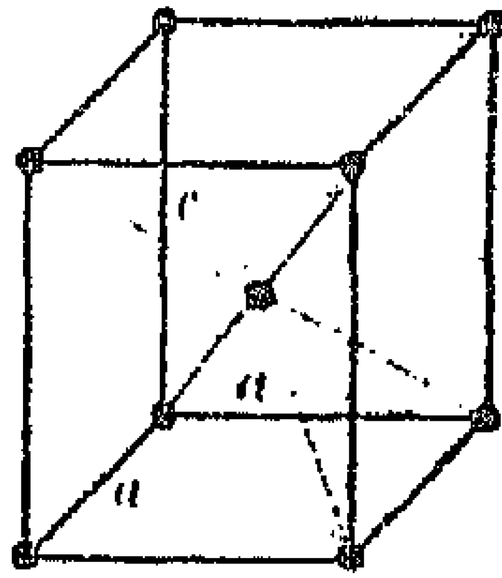
مكعب بسيط



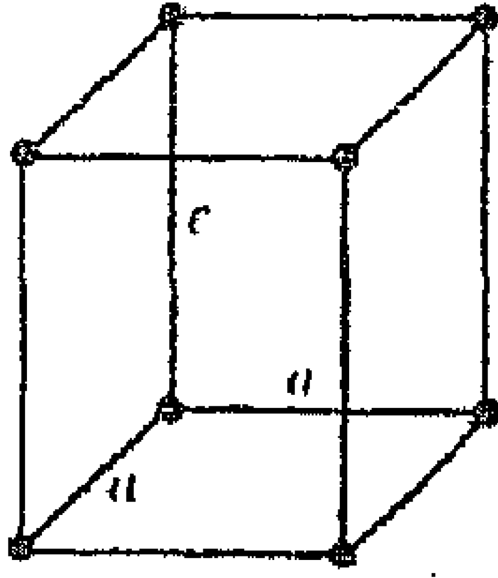
معين متمركز الجسم



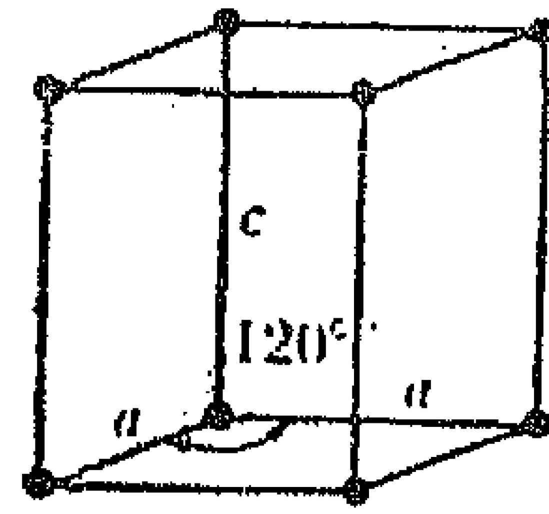
معين بسيط



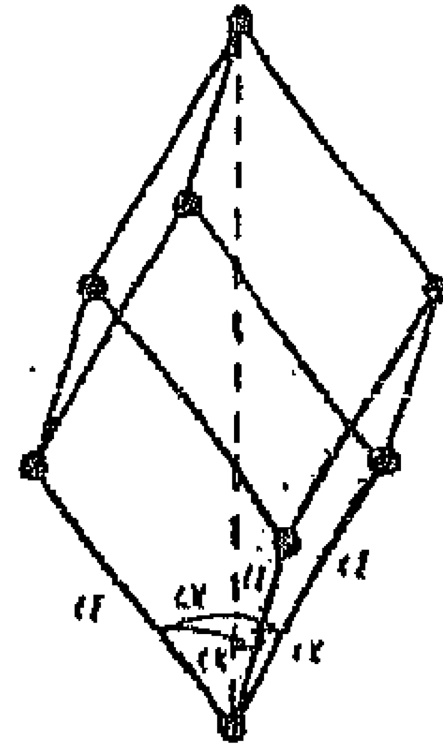
رباعي متمركز الجسم



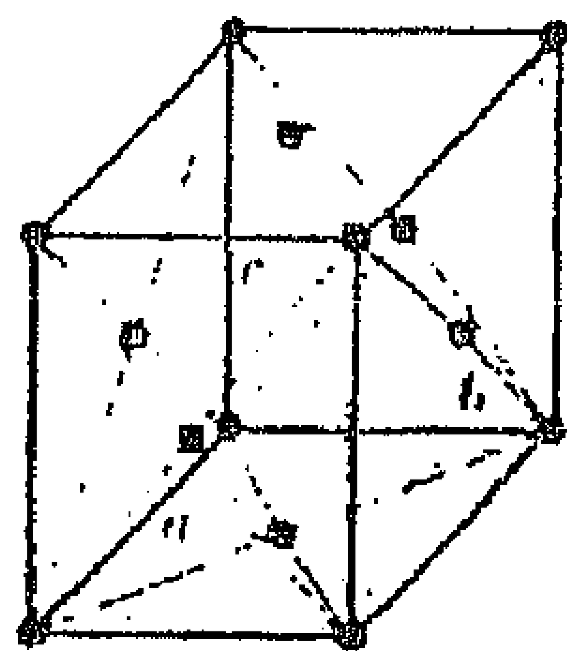
رباعي بسيط



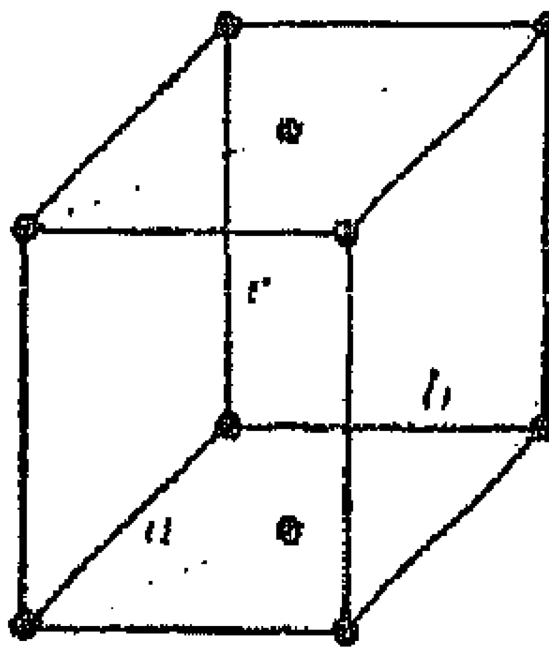
سداسي



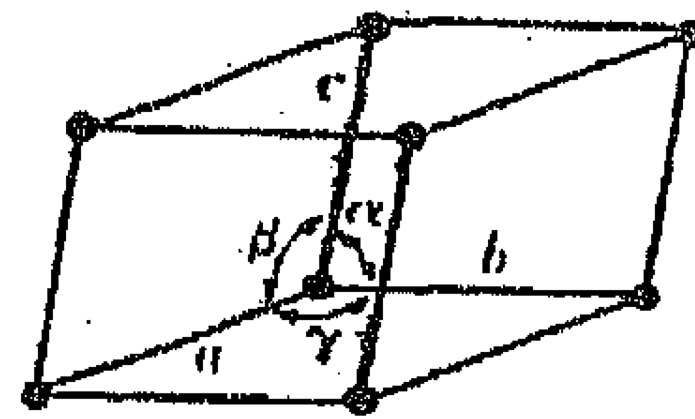
ثلاثي الاضلاع



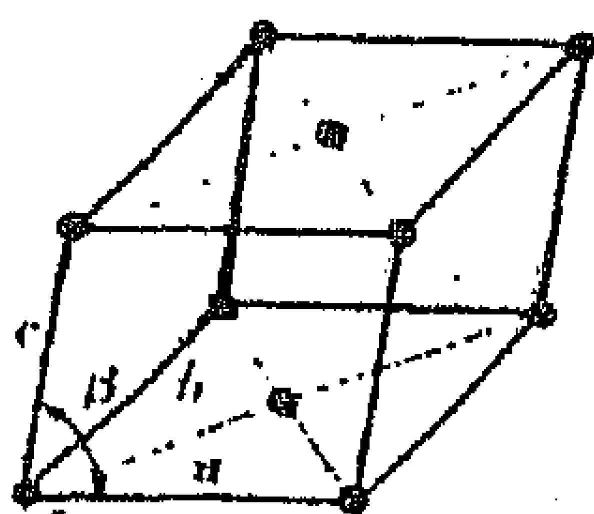
معيني متمركز الوجه



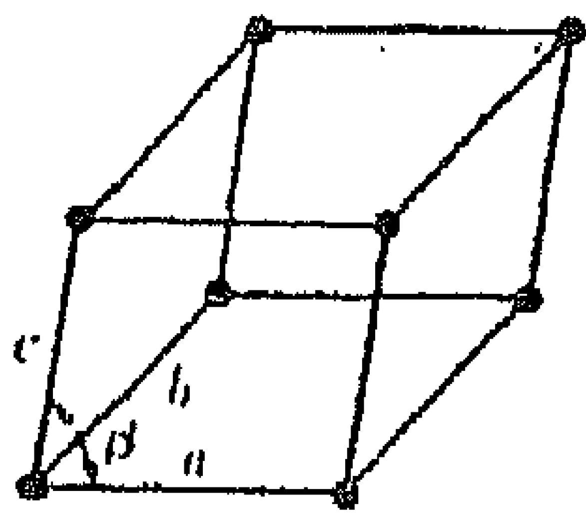
معيني متمركز القاعدة



ثلاثي الميل



احادي الميل متمركز القاعدة



احادي الميل بسيط

**الشكل(3-3) الانظمة الاربعة عشر لشبيكات برافس.**

## ٤-٣ تعيين نقاط الشبيكة:

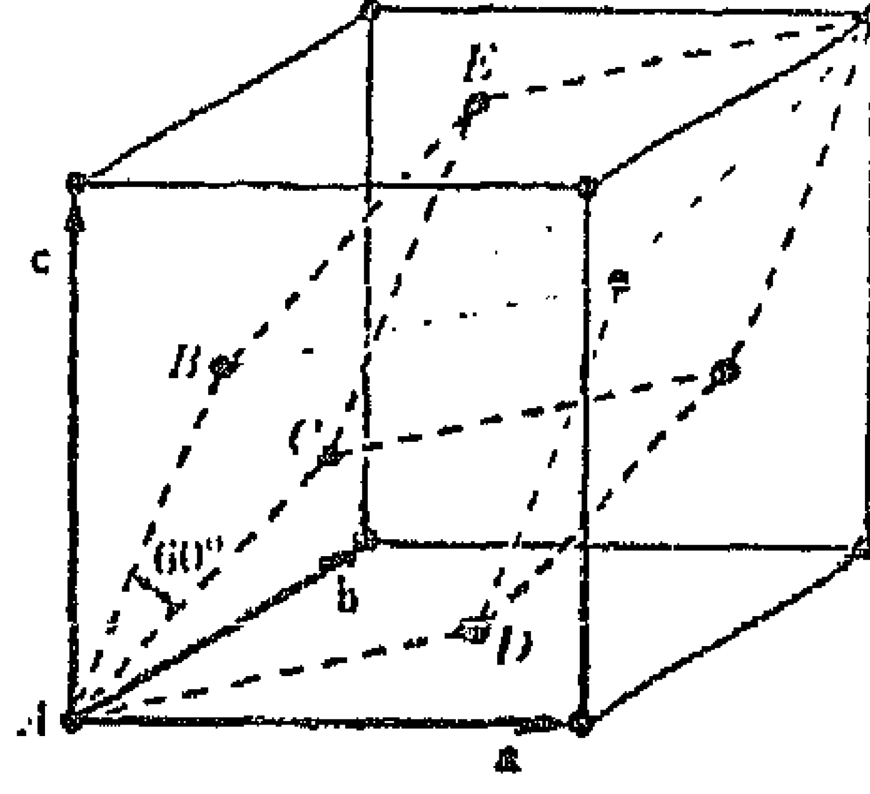
يمكن تعيين مكان اي نقطة شبيكة في الخلية بدلالة الاحداثيات . فإذا كان المتجه (Vector) من نقطة الاصل في الخلية الى النقطة المراد تعيينها، له المركبات $z\vec{c}$ و $y\vec{b}$ و $xa$ ، حيث يكون كل من x و y و z صفراً او واحد او كسراً،فإن احداثيات النقطة هي xyz . فإذا أخذت النقطة (A) في الشكل (3-4) كنقطة أصل فتكون احداثياتها 000 واحداثيات النقاط B و C و D هي $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$ و $\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$ و $0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ على التوالي عند المقارنة باضلاع المكعب . أما احداثيات النقطة E فهي $1\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ وهي مكافئة للنقطة D والمبتعده عنها بمقدار المتجه $\vec{c}$ . يمكن ان تكون احداثيات النقاط المكافئة متماثلة إذا اضيفت او طرحت مجموعة ذات اعداد صحيحة من الاحداثيات ففي الحالة اعلاه، على سبيل المثال، إذا تم طرح 001 من $1\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ (أحداثيات E) سيعطي $0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ (وهي احداثيات D).

يلاحظ: أن احداثيات النقطة في مركز جسم الخلية على سبيل المثال، هي $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ بغض النظر عن نوع وحجم الخلية وسواء كانت مكعبة ام غير ذلك. تعتبر عادة احداثيات النقطة المنقولة الناتجة من كل النقاط الثمانية على زوايا الخلية (حيث تشترك كل واحدة منها بمقدار الثمن ( $\frac{1}{8}$ ) من حجمها في الخلية) هي 000 ، يمكن اختصار احداثيات النقاط الاساسية والمنقولة لشبيكات نقطية مختلفة بالآتـي:

للخلية المتمركزة الجسم 000 و $\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$

للخلية المتمركزة الوجه 000 و $0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{2}0\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$

للخلية المتمركزة القاعدة 000 و $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$



الشكل (3-4) شبيكة نقطية متمركزة الوجه والتي تشير الى الخلايا المكعبة وثلاثية الأضلاع.

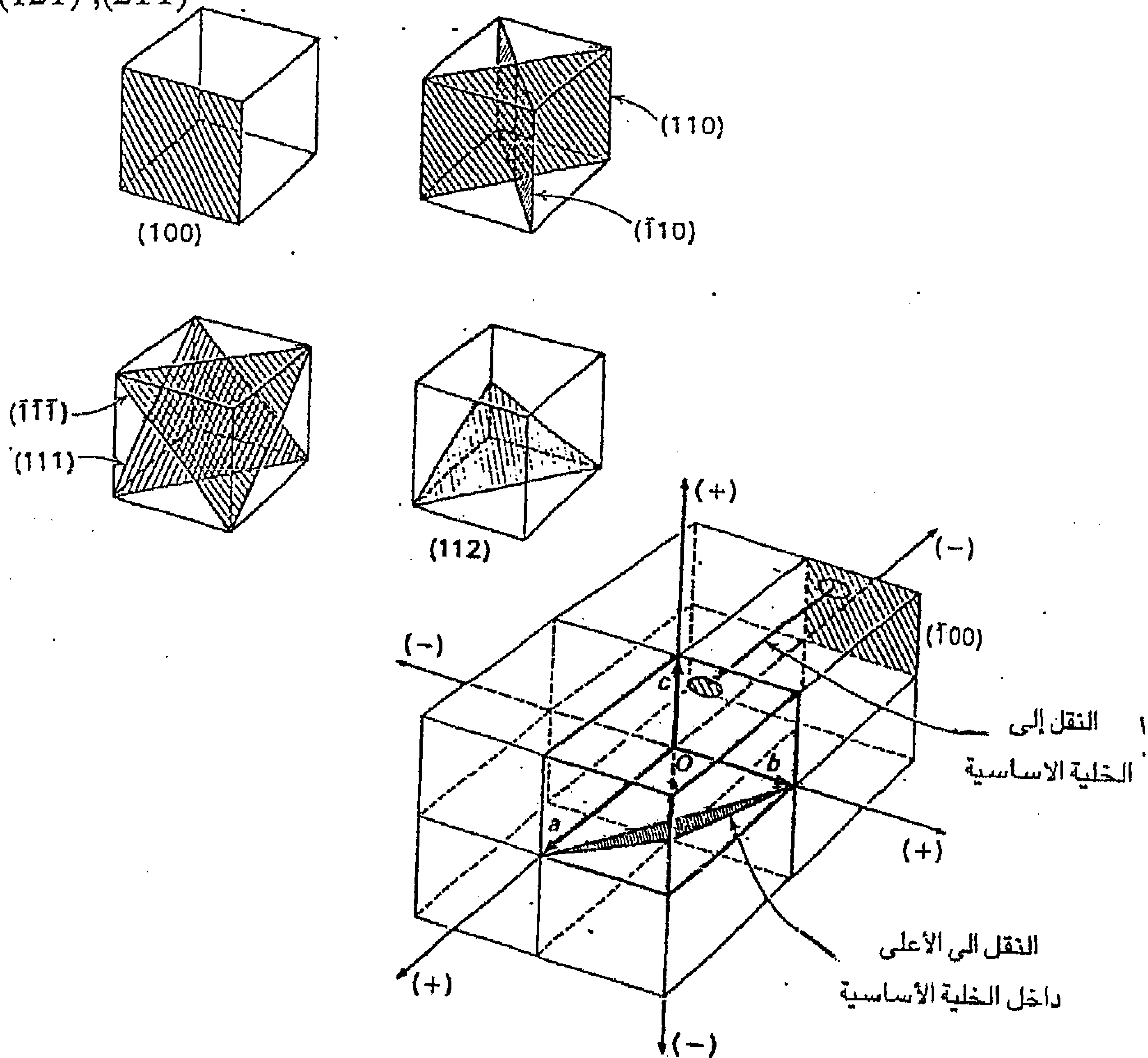
## ٣-٥ اتجاهات ومستويات الشبكة البلورية:

### ٣-٥-١ المستويات في البلورات:

تستخدم أدلة ملر (Miller indices) لتعيين المستويات او السطوح الذرية في البلورة التي يتم تحديدها في الخلية الأساسية عادةً. وأدلة ملر هي أرقام تكتب بأسلوب متعارف عليه، فالمستوى المتكون بالتقاطع مع المحاور a و b و c في الشكل 2-3 يعين بأخذ مقلوبات قيم التقاطعات ثم اختزال هذه المقلوبات الى أصغرأعداد صحيحة وذلك بضربها بالعدد المناسب . فالأعداد الناتجة تحصر بين قوسين هلاليين (hkl) وتدعى بادلة ملر يشير القوسان الهلاليان الى أن أدلة ملر هذه خاصة بمستو معين hkl يوضح الشكل (3-5) ادلة ملز لعدة مستويات . ومن الجدير بالذكر ان طريقة المقلوبات تسمح ببساطة لكل التقاطعات ان تكون متعلقة بالخليه الاسايسه المحدده بأطوال اضلاعها a وb وc. وعليه فالمستوى الذي له التقاطعات $\frac{c}{8}$ و $\frac{b}{4}$ و $\frac{a}{4}$ تكون مقلوباتها 8 و 4 و 4 فتكون ادلة ملز اذن (448) وهذا موازٍ للمستوى الذي ادلته (112) و المتكون من التقاطعات $\frac{c}{2}$ و b و a . تكون جميع المستويات التي تمتلك تقاطعات خارج الخلية الاساسية ذات علاقة

بمستوى أقل رتبة يقع ضمن الخلية الأساسية. فعلى سبيل المثال يمكن اختزال التقاطعات C و b 2 و 2a الى المقلوبات 1 و $\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{2}$ أو (112) . تكتب مجموعة السطوح التي لها نفس ادلة ملر والتي تقع ضمن الخلية الأساسية كالآتي {112} اي ان ادلة ملر محصورة بين قوسين كبيرين (brackets) والمجموعة تعني سطوح متكافئة في الوضع في تلك الشبيكة البلورية. تتكون المجموعة {112} هذه من 24 مستوٍ هي:

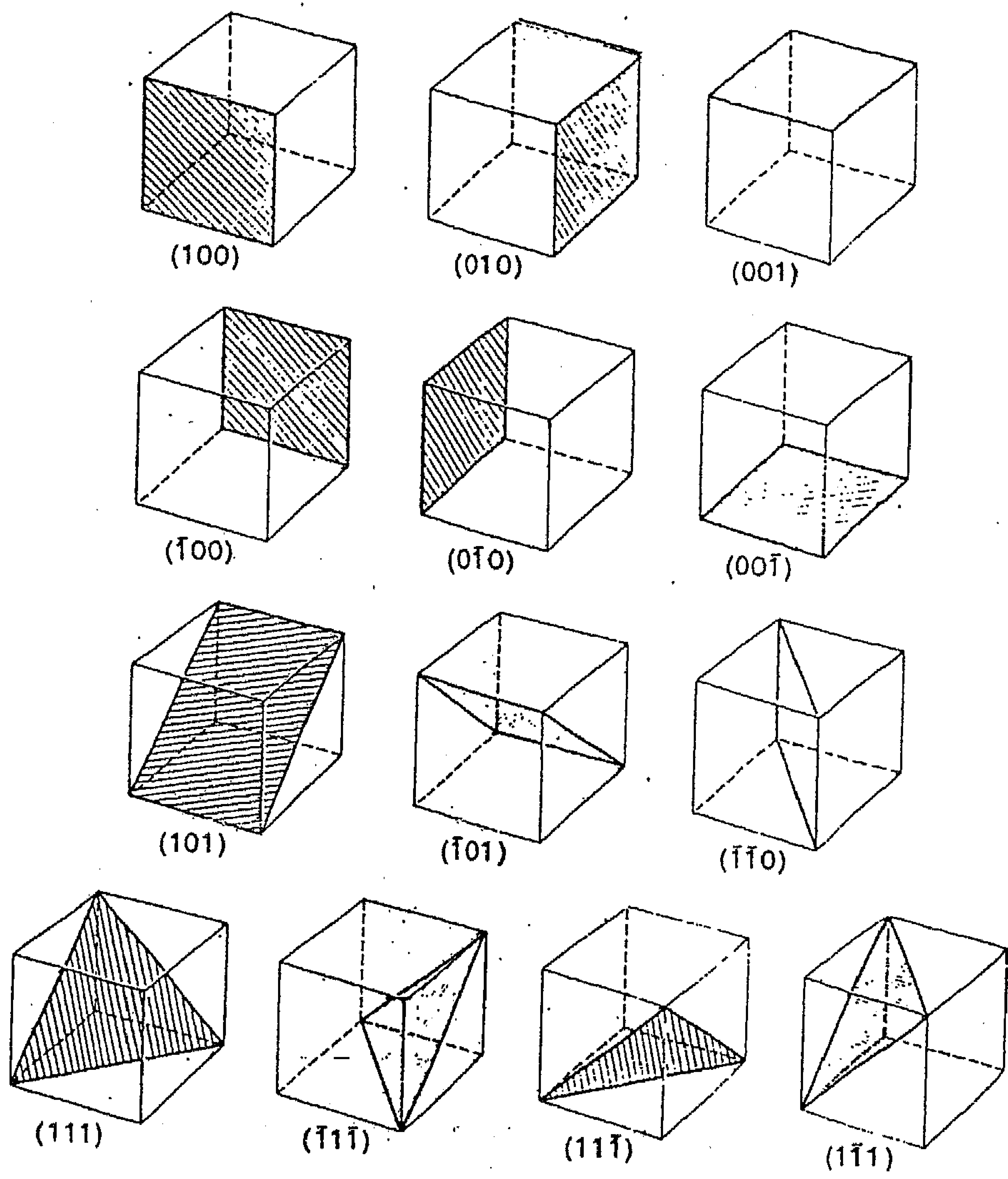
$\{112\}= (112), (121), (211), (\bar{1}12), (\bar{1}21), (\bar{2}11), (1\bar{1}2), (1\bar{2}1), (2\bar{1}1), (12\bar{1}),$
$(21\bar{1}), (11\bar{2}), (\bar{1}\bar{1}2), (\bar{1}\bar{2}1), (\bar{2}\bar{1}1), (1\bar{1}\bar{2}), (1\bar{2}\bar{1}), (\bar{2}1\bar{1}), (\bar{1}1\bar{2}), (\bar{1}2\bar{1}), (2\bar{1}\bar{1}), (\bar{1}\bar{1}\bar{2}),$
$(\bar{1}\bar{2}\bar{1}), (\bar{2}\bar{1}\bar{1})$




الشكل (3-5) تعيين ادلة ملر لمستويات البلورة وأسلوب النقل ذو المكعبات الثمانية للإشارة الى المستويات ذات الادلة السالبة.

تعني الأدلة التي عليها علامة (خط صغيرbar) ان لها تقاطعات سالبه. فإذا لوحظ الشكل (3-5) على سبيل المثال، فالتقاطعات c - و b - و a - تكتب بالصوره ($\bar{1}\bar{1}\bar{1}$) والتي يجب ان تظهر ايضاً ضمن الخلية الاساسية كما يبدو في الشكل اعلاه. ومن المفيد عند الاشتغال مع المستويات في بلوره استخدام نظام الأدلة لثمانية مكعبات كما مبين في الشكل (3-5) لربط المستويات ذات الأدلة السالبة بالخلية الأساسية.

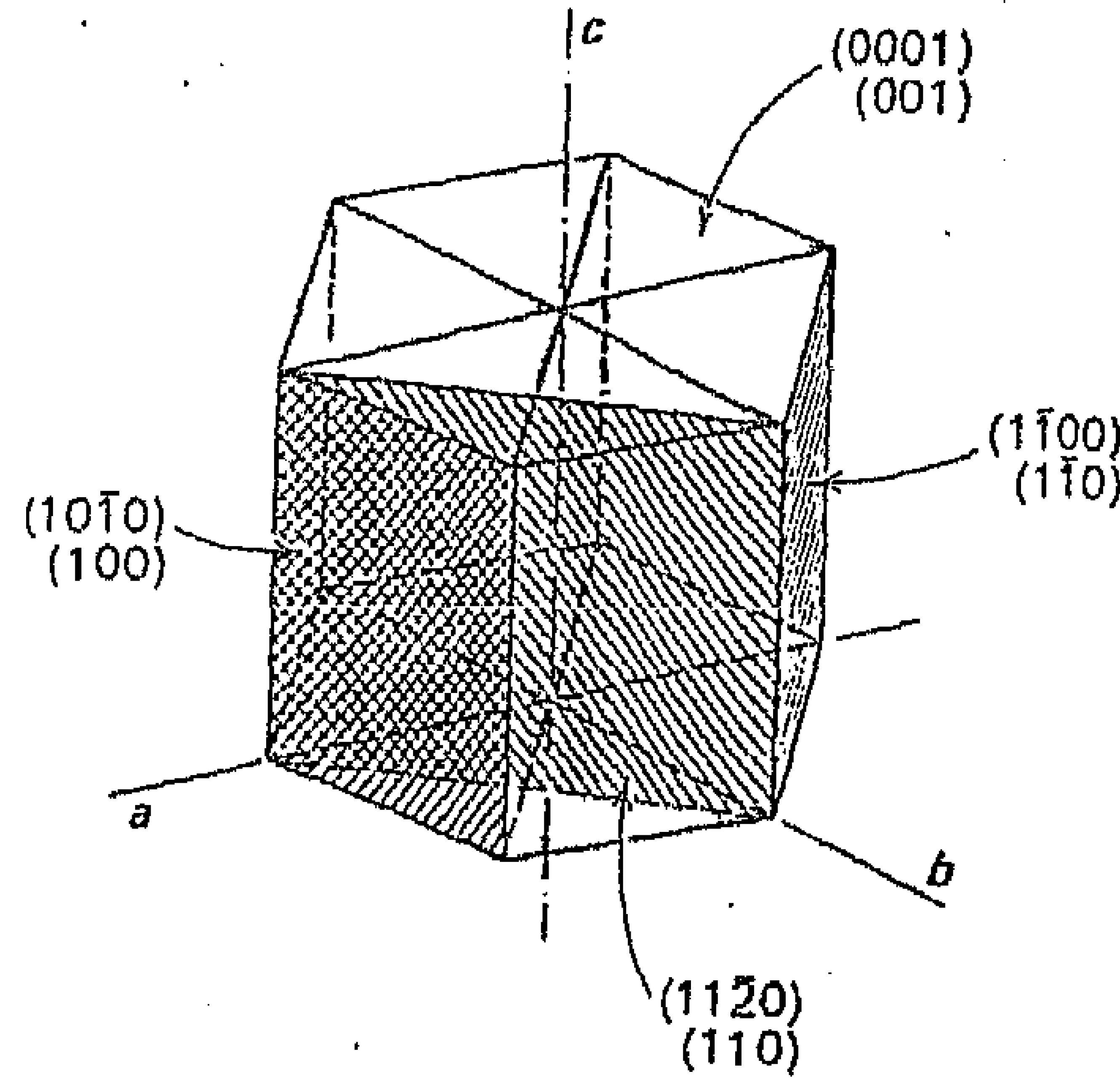
ولتوضيح هذه الفكرة يمكن ملاحظة عدد من المستويات البلورية المعتادة، الشكل (3-6). نلاحظ المستويات ذات الادلة الموجبة وهي (001) و (010) و (100) . أما مستويات الادلة السالبة فيمكن تصورها عند نقل نقطة الاصل في احد اركان الخلية الاساسية بحيث يتقاطع ذلك المستوى مع الاحداثيات الثلاثة ولايمر بنقطة الاصل، كما موضح في الشكل (3-6) . ان المستويات ($00\bar{1}$) و ($0\bar{1}0$) و ($\bar{1}00$) هي سطوح بلورية مكافئة ومقابلة للسطوح المذكورة اعلاه ذات الادلة الموجبة. وتمثل السطوح ($\bar{1}10$)و ($\bar{1}01$) و ($10\bar{1}$) سطوح بلوريه معينة ذات دليل سالب من ادلتها . في حين يكون المستوى ($\bar{1}\bar{1}0$) مكافئاً ومقابلاً للمستوى (110)لكنه لايمكن وصفه ضمن الخلية الاساسية سوية مع مكافئة . والواقع فلا يوجد ضير حيث مايهمنا هنا هو نوع المستوى في الشبيكة البلورية. كذلك يمثل المستوى ($\bar{1}\bar{1}1$) المستوى المكافئ والمقابل للمستوى ($1\bar{1}1$) ضمن الخلية الاساسية.




الشكل (3-6) بعض السمتويات البلورية المهمة والتي لها
ادلة ملر موجبة او سالبة وموجبة.

## ٢-٥-٣ اسلوب كتابة ادلة المستوى في البلورة السداسية:

هناك بعض المساوئ من استخدام ادلة ملر عند التعامل مع البلورات السداسية (hexagonal crystals) وهي ان مستويات الشبيكة السداسية المكافئة ليست لها ادلة متشابهة. ولحل هذه المشكلة استخدمت ، وبصورة عامة، ادلة ملر – برافس (Miller - Bravais indices) عند التعامل مع البلورة السداسية وهي (hkil) حيث ان i = −(h+k). وبناء على ذلك فالمستويين $(\bar{1}10)$ و (100) في النظام البلوري السداسي مكافئة للمستويين $(\bar{1}100)$ و $(10\bar{1}0)$ أي ان مجموعتهما هي $\{\bar{1}100\}$ . يوضح الشكل (3-7) عدداً من المستويات الذرية في البلورة السداسية بدلالة الأدلة الثلاثة (Miller indices) وبدلالة الأدلة الرباعية (Miller- Bravais indices) .




**الشكل(3-7) المستويات البلورية في النظام السداسي.**

## ٣-٥-٣ الاتجاهات في البلورات:

لقد تم شرح أسلوب تحديد ادلة المستويات البلورية يلزمنا الآن معرفة كيفية تعيين ادلة الاتجاهات في البلورة ايضاً. والأدلة المتبناه للدلالة على الاتجاه تكتب كالآتي[u v w]، أما مجموعة الاتجاهات التي لها نفس الأدلة فتكتب محصورة بين

قوسين زاويين (carels) اي <u v w>. تعين u v w ببساطة احداثيات نقطة ما انطلاقاً من نقطة اصل محدده (الشكل 3-2) بينما تعني [u v w] اتجاه خط ما ابتداء من نقطة الأصل الى النقطة المعينة. تستخدم اصغر اعداد صحيحة للأدلة u و v و w لتعيين الاتجاهات البلورية ويتم بشكل عام تجنب استخدام الكسور. ولهذا تكتب الأدلة بشكل قياسي من حيث أن الاتجاهات البلورية تؤلف ادلة او اعداد بسيطة للمتجه . تظهر في بعض الاحيان ادلة سالبه في بعض الاتجاهات البلورية ، على سبيل المثال، في الاتجاه العمود على المستوى ذو الادلة السالبة.

ان الرمز[u v w] يكفي للدلالة على الاتجاه في البلورات المتعامدة الاضلاع والبلورات بشكل عام، ماعدا شبيكة البلورة السداسية . أما الرموز او الأدلة الاكثر استعمالاً في النظام السداسي فتكتب بالصورة الآتية [U VW] او [u v t w] حيث أن :

$$U = u - t\ ,\ \ V = v - t\ ,\ \ W = w\ ,\ t = -(u + v) \qquad \text{..........}\ (2\text{-}3)'$$

أما التحويل من الادلة الثلاثية [UVW] الى الرباعية [u u t w] فيكون باستخدام العلاقات التالية:

$$u = \frac{1}{3}\ (2\,U - V)\ ,\ v = \frac{1}{3}\ (2V - U),\ t = -(u - v),\ w = W \qquad \text{......}(3\text{-}3)$$

ويمكن استخدام نفس هيئة هذه العلاقات عند التحويل من الأدلة الثلاثية الى الرباعية وبالعكس.

## ٦-٣ علاقة حجم وكثافة الذرات مع الخلية الأساسية:

يمكن بسهولة معرفة العلاقة بين طول ضلع (حرف) الخلية الأساسية وقطر الذرة. ويتم ذلك بعد تحديد اتجاه التراص(packing direction) في ذلك النظام . فعلى سبيل المثال، تكون اتجاهات التراص في بنية المكعب البسيط (Simple Cubic Structure) هي < 100 > وفي المكعب المتمركز الوجه (FCC) هي <110> وفي المكعب المتمركز الجسم (BCC) هي <111> اما في السداسي المتراص (HCP)

فيكون <$10\bar{1}0$> . ولهذا تكون العلاقات بين نصف قطر الذرة (R) وطول ضلع الخلية (a) كالآتي:

المكعب البسيط .S.C $R = \frac{a}{2}$

المكعب المتمركز الوجهFCC $R = \frac{\sqrt{2}}{4} a$ ........(4-3)

المكعب المتمركز الجسم BCC $R = \frac{\sqrt{3}}{4} a$

السداسي المتراصHCP $R = \frac{a}{2}$

أما كثافة الذرات او معامل التراص الذري (Atomic Packing Factor) في الخلية الاساسية فيتم تعريفه بأنه نسبة حجم الذرات العائدة كلياً لتلك الخلية مقسوماً على حجم الخلية نفسها. ويكتب عادة بالنسبة المئوية . لقد تم حساب هذه النسبة في بعض البنى البلورية المألوفة فكانت على وجه التقريب ، كالآتي:

| | | |
|---|---|---|
| في المكعب البسيط | S.C | 52% |
| المكعب المتمركز الجسم | BCC | 68% |
| المكعب المتمركز الوجه | FCC | 74% |
| السداسي المتراص | HCP | 74% |

والفرق الوحيد بين FCC و HCP هو في نسق او اسلوب التراص .

## ٧-٣ المسافة بين المستويات Interplanar distance

يمكن ايجاد المسافة (d) بين المستويات المتجاورة في المجموعة (hkl) بتطبيق العلاقات الآتية وحسب النظام البلوري .

ففي المكعب $\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2}$ ..............(5-3)

– رباعي الاضلاع $\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2}$ .........(6-3)

- السداسي

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3}\left(\frac{h^2+hk+k^2}{a^2}\right) + \frac{l^2}{a^2} \quad \text{........(7-3)}$$

- ثلاثي الاضلاع

$$\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2+k^2+l^2)\sin^2\alpha + 2(hk+kl+hl)(\cos^2\alpha + \cos\alpha)}{a^2(1-3\cos^2\alpha + 2\cos^3\alpha)} \quad \text{...... (8-3)}$$

- المعيني:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad \text{....(9-3)}$$

- احادي الميل

$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{\sin^2\beta}\left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2\sin^2\beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl\cos\beta}{c^2}\right) \text{...(10-3)...}$$

ثلاثي الميل :

$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{V^2}(S_{11}h^2 + S_{22}k^2 + S_{33}l^2 + 2S_{12}hk + 2S_{23}kl + 2S_{13}hl) \quad \text{......(11-3)}$$

حيث تمثل

a و b و c أطوال احرف الخلية و$\alpha$ و$\beta$ و$\gamma$ الزاوية بين كل اثنين منها و V حجم الخلية الاساسية وأن

$S_{11} = b^2 c^2 \sin^2 \alpha$

$S_{22} = a^2 c^2 \sin^2 \beta$

$S_{33} = a^2 b^2 \sin^2 \gamma$

$S_{12} = abc^2(\cos \alpha \cos b - \cos \gamma)$

$S_{23} = a^2bc\ (\cos \beta\ \cos \gamma - \cos \alpha)$

$S_{13} = ab^2c\ (\cos \gamma\ \cos\alpha - \cos \beta)$

## ٨-٣ الزوايا بين المستويات البلورية:

يمكن ايجاد مقدار $\phi$ التي تمثل الزاوية بين المستوى $(h_1k_1\ l_1)$ ذو المسافة البينه $d_1$ والمستوى $(h_2k_2l_2)$ ذو المسافة البينه $d_2$ من المعادلات الآتية وحسب البنية البلورية.

– في المكعب

$$\cos\phi = \frac{h_1h_2+k_1k_2+l_1l_2}{\sqrt{(h_1^2+k_1^2+l_1^2)(h_2^2+k_2^2+l_2^2)}} \quad ...(12\text{-}3)$$

– وفي رباعي الأضلاع

$$\cos\phi = \frac{\frac{h_1h_2+k_1k_2}{a^2} + \frac{l_1l_2}{c^2}}{\sqrt{\left(\frac{h_1^2+k_1^2}{a^2} + \frac{l_1^2}{c^2}\right)\left(\frac{h_2^2+k_2^2}{a^2} + \frac{l_2^2}{c^2}\right)}} \quad ...(13\text{-}3)$$

وفي السداسي

$$\cos\phi = \frac{h_1h_2+k_1k_2+\frac{1}{2}(h_1k_2+h_2k_1)+\frac{3a^2}{4c^2}l_1l_2}{\sqrt{\left(h_1^2+k_1^2+h_1k_1+\frac{3a^2}{4c^2}l_1^2\right)\left(h_2^2+k_2^2+h_2k_2+\frac{3a^2}{4c^2}l_2^2\right)}} \quad ...(14\text{-}3)$$

وفي ثلاثي الأضلاع

$$\cos\phi = \frac{a^4d_1d_2}{V^2}\left[\sin^2\alpha(h_1h_2+k_1k_2+l_1l_2) + (\cos^2\alpha - \cos\alpha)(k_1l_2+k_2l_1+l_1h_2+l_2h_1+h_1k_2+h_2k_1)\right] \quad ..(15\text{-}3)$$

وفي المعين

$$\cos\phi = \frac{\frac{h_1h_2}{a^2} + \frac{k_1k_2}{b^2} + \frac{l_1l_2}{c^2}}{\sqrt{\left(\frac{h_1^2}{a^2}+\frac{k_1^2}{b^2}+\frac{l_1^2}{c^2}\right)\left(\frac{h_2^2}{a^2}+\frac{k_2^2}{b^2}+\frac{l_2^2}{c^2}\right)}} \quad ...(16\text{-}3)$$

- وفي احادي الميل:

$$\cos\phi = \frac{d_1 d_2}{\sin^2\beta}\left[\frac{h_1 h_2}{a^2} + \frac{k_1 k_2 \sin^2\beta}{b^2} + \frac{l_1 l_2}{c^2} - \frac{(l_1 h_2 - l_2 h_1)\cos\beta}{ac}\right] \quad \text{..............(17-3)}$$

وفي ثلاثي الميل:

$$\cos\phi = \frac{d_1 d_2}{V_2}[S_{11}\, h_1 h_2 + S_{22}\, k_1 k_2 + S_{33}\, l_1 l_2 + S_{23}(k_1 l_2 + k_2 l_1) + S_{13}(l_1 h_2 + l_2 h_1) + S_{12}(h_1 k_2 + h_2 k_1)] \quad \text{.............(18-3)}$$

## ٣-٩ حجم الخلية الأساسية:

يمكن معرفة حجم الخلية الأساسية (V) وحسب البنية البلورية بدلالة طول أحرف الخلية (c و b و a ) من العلاقات الآتية:

- فللمكعب $V = a^3$ ............ (19a-3)

- ولرباعي الاضلاع $V = a^2 c$ ...........(19b-3)

- وللسداسي $V = \frac{\sqrt{3}\, a^2 c}{2} = 0.866 a^2 c$ ........(19c-3)

- ولثلاثي الأضلاع: $V = a^3\sqrt{1 - 3\cos^2\alpha + 2\cos^3\alpha}$ .......(19d-3)

- وللمعيني $V = abc$ ..............(19e-3)

- ولأحادي الميل $V = abc \sin\beta$ .........(19f-3)

- ولثلاثي الميل $V = abc\sqrt{1 - \cos^2\alpha - \cos^2\beta - \cos^2\gamma + 2\cos\alpha\cos\beta\cos\gamma}$ ....(19g-3)

## ١٠-٣ كثافة المادة:

يمكن حساب كثافة المادة اذا علم وزنها الذري وعرفت بنيتها البلورية بوساطة حيود الاشعة السينية .

فالكثافة $(\rho)$ = وزن الذرات في الخلية الأساسية / حجم الخلية الأساسية

أو $$\rho = \frac{n\,A}{NV} \quad ..........(20\text{-}3)$$

حيث تمثل n عدد الذرات في الخلية الأساسية.

A: الوزن الذري.

N: عدد افوكادرو $(6.023 \times 10^{23})$

V: حجم الخلية الأساسية

وتسمى الكثافة المحسوبة هذه بكثافة الاشعة السينية في بعض الاحيان.

# تمارين الفصل الثالث

١- عرف معنى المواد البلوريه وغير البلورية واعط أمثلة على ذلك لكل منهما.

٢- عرف مايلي :أ- الخلية الأساسية . ب- الخلية الأولية . جـ- الشبيكة البلورية.

٣- أ- صنف الانظمة البلورية واذكر مثالاً لكل صنف منها.

ب- ماهي المعلمات التي يتم على أساسها التفريق بين الانظمة البلورية الاربعة عشر.

٤- ارسم خلايا البنى البلوريه الاكثر شيوعاً في المعادن مع ذكر معدنين يتبلوران على شاكلة كل منهما.

٥- لماذا استعيض عن ادلة ملر بأدلة ملر- برافس (الرباعية) في تعيين المستويات او المتجهات في البنية البلورية السداسية.

٦- ارسم الاتجاهات التالية $[100]$ و $[1\bar{1}0]$ و $[01\bar{1}]$ و $[111]$ و $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ و $[10\bar{1}1]$ و $[11\bar{2}0]$ و $[122]$ و $[1\bar{1}02]$.

٧- ارسم المستويات الذرية التالية : $(100)$ و $(10\bar{1})$ و $(201)$ و $(20\bar{2}1)$ و $(10\bar{1}1)$ و $(\bar{1}012)$ و $(01\bar{1}0)$ و $(\bar{2}11)$ ثم $(1\bar{1}\bar{1})$ .

٨- كم هو عدد اعضاء (مستويات) المجموعة {123} اذكرها بالتفصيل .

٩- اشتق العلاقة بين ثابت الخلية (a) ونصف قطر الذرة في المكعب البسيط والمكعب المتمركز الجسم والمكعب المتمركز الوجه ثم السداسي المتراص .

١٠- احسب معامل التراص الذري (APF) في كل من بنى المكعب البسيط والمكعب المتمركز الجسم والمكعب المتمركز الوجه والسداسي المتراص. ماذا نستنتج من ذلك .

١١- احسب المسافة (d) بين المستويات الذرية (111) في بنيه الشبيكه المكعبة.

١٢- احسب الزوايا بين المستوى (111) وبقية اعضاء المجموعة {111} في بنية الشبيكه المكعبه.

١٣- احسب نصف قطر ذرة عنصر الكروم (BCC) اذا علمت ان كثافته $(7.19g/cm^3)$ ووزنه الذري 52.0 gm/mole .

١٤- احسب كثافة عنصر النحاس (Cu) (FCC)إذا علمت أن وزنه الذري 63.5g/mole وأن نصف قطر ذرته 0.1278 nm . قارن بين هذه القيمة وقيمة كثافة النحاس العملية 8.94g/mole . ماذا تستنتج من ذلك .

# الفصل الرابع

# خصائص الأشعة السينية

## ١- ٤ المقدمة:

لقد تم اكتشاف الأشعة السينية سنة ١٨٩٥ من قبل العالم الفيزياوي الألماني رونتكن (Roentgen) وسميت بهذا الإسم لأن طبيعتها كانت مجهولة في ذلك الوقت. تختلف هذه الاشعة عن الضوء الاعتيادي من حيث كونها غير مرئية، لكنها تسير بخطوط مستقيمة وتؤثر على افلام التصوير كما هي الحالة في الضوء. ومن الجانب الآخر، فإن لها قدرة أكبر بكثير من الضوء على الاختراق فتخترق جسم الانسان والخشب وحتى قطع المعادن السميكة والأجسام المعتمة الأخرى بسهولة نسبياً كما تقدم التنويه عنه في الفصل الأول.

لقد تم تحديد طبيعة هذه الأشعة سنة ١٩١٢ وفي هذه السنة بالذات تم اكتشاف ظاهرة حيود الاشعة السينية بواسطة البلورات، وهذا الاكتشاف أثبت الطبيعة الموجية لهذه الأشعة وزودنا بطريقة جديدة لدراسة بنية المادة. يظهر الحيود بشكل مباشر تفاصيل البنية الداخلية والى حد $10^{-8}$ cm فصار لحيود الأشعة السينية تطبيقات كثيرة في حقل هندسة المعادن والمواد بشكل عام.

لقد علمنا أن طبيعة الأشعة السينية هي نفس طبيعة الضوء إلا أن طولها الموجي قصير جداً . يستعمل الانكستروم (Å) (Angstrom) عادة، كوحدة لقياس طولها الموجي، وهو يساوي $10^{-8}$ cm وعليه فكل 1 nm =10Å والطول الموجي للأشعة المستخدمة في الحيود يقع بين 0.5-2.5Å . بينما يكون الطول الموجي للضوء المرئي بحدود 6000Å، إذا ما اريدت المقارنة.

يرتبط الطول الموجي مع التردد بالعلاقة التالية:

$$\lambda = \frac{C}{\upsilon} \quad ............. (1-4)$$

حيث تمثل $\lambda$ الطول الموجي و $\upsilon$ التردد و C سرعة الضوء = $3x10^8 m/sec$ .

تحمل الاشعاعات الكهرومغناطيسية كالأشعة السينية، طاقة ويدعى معدل انسياب هذه الطاقة خلال وحدة المساحة العمودية على اتجاه حركة الموجه بالشدة (I) . يتناسب معدل قيمة الشدة طردياً مع مربع السعة "A" (Amplitude). تقاس الشدة بالوحدات المطلقة ($Joules/m^2/sec$). إلا انه نادراً ما تقاس الشدة بهذه الوحدات وبدلاً من ذلك تقاس بأساس نسبي كمقدار أسوداد فلم التصوير الذي تم تعريضه للأشعة السينية.

تشع الشحنات الكهربائية المعجلة طاقه. هذه الطاقة عبارة عن أشعة كهرومغناطيسية. يمكن اعتبار الاشعة الكهرومغناطيسية حسب نظرية الكم (quantum theory) ، سيل من كمات الطاقة او الفوتونات (Photons) يمتلك كل فوتون من الطاقة (E) حسب معادلة (1-1) ، ما يعادل $E=h\upsilon$ حيث يمثل h ثابت بلانك = $6.63x10^{-34}$ J.sec .

## ٢-٤ الطيف المستمر للأشعة السينية:

تتولد الأشعة السينية عندما يتباطأ بسرعة اي جسيم (دقيقة) مشحون له طاقة عالية. تستخدم الالكترونات عادة لهذا الغرض حيث تتولد الاشعة في انبوبة تحتوي على مصدر للالكترونات مع قطبين معدنيين. يتم تسليط فرق جهد عالي على طرفي القطبين. يسحب فرق الجهد هذا الالكترونات بسرعة نحو المصعد (anode) او الهدف (Target) ، حيث تصطدم به الالكترونات بسرعة عالية جداً. تتولد الاشعة عند نقطة الاصطدام بكل الاتجاهات . يمكن ان تعطى الطاقة الحركية للإلكترونات عند الاصطدام بالآتي

$$K.E. = eV = \frac{1}{2} mv^2 \qquad ............(2-4)$$

v سرعة الالكترونات

m كتلة الالكترون ( $9.11x10^{-31}$ kg)

V فرق الجهد المعجل

e شحنة الالكترون ($1.6x10^{-19}$ Coul)

تتحول اغلب الطاقة الحركية (K.E) للإلكترونات القاصفة للهدف الى حرارة واقل من %1 من هذه الطاقة تتحول الى أشعة سينية .

عندما تُحلل الأشعة الآتية من الهدف ، يتبين انها تحتوي على أطوال موجيه عديده. تتغير شدة الأشعة مع الطول الموجي وتعتمد كذلك على فولتية الانبوبه. يبين الشكل (4-1) نوع المنحنيات الناتجة بين الطول الموجي والشدة النسبية. تبقى الشدة صفراً حتى طول موجي معين يسمى حد الطول الموجي القصير "$\lambda_{swl}$"Short wavelength limit) ثم تزداد بسرعة الى قيمه قصوى ثم تنخفض تدريجياً حيث لايوجد حد نهائي في جانب الطول الموجي الطويل. وعندما تزداد الفولتيه المعجلة تزداد الشدة أيضاً ويقل الطول الموجي لكل من منطقة القيمة القصوى للشدة وحد الطول الموجي القصير. فإذا تم التركيز بالمنحنيات الانسيابية المتعلقة بالفولتيه المسلطة التي مقدارها 20kv او أقل في حالة هدف من المولوبدنوم (Mo). فالأشعة المثله بهذه المنحنيات تسمى الأشعة المستمرة او البيضاء لأنها تتألف من العديد من الأطوال الموجية المستمرة كالضوء الابيض.

وإذا فرض ان بعض الالكترونات تفقد طاقتها بصدمه واحدة فتكون الطاقة العظمى للفوتون المتولد مساوية للطاقة الحركية المفقودة للإلكترون اي ان :

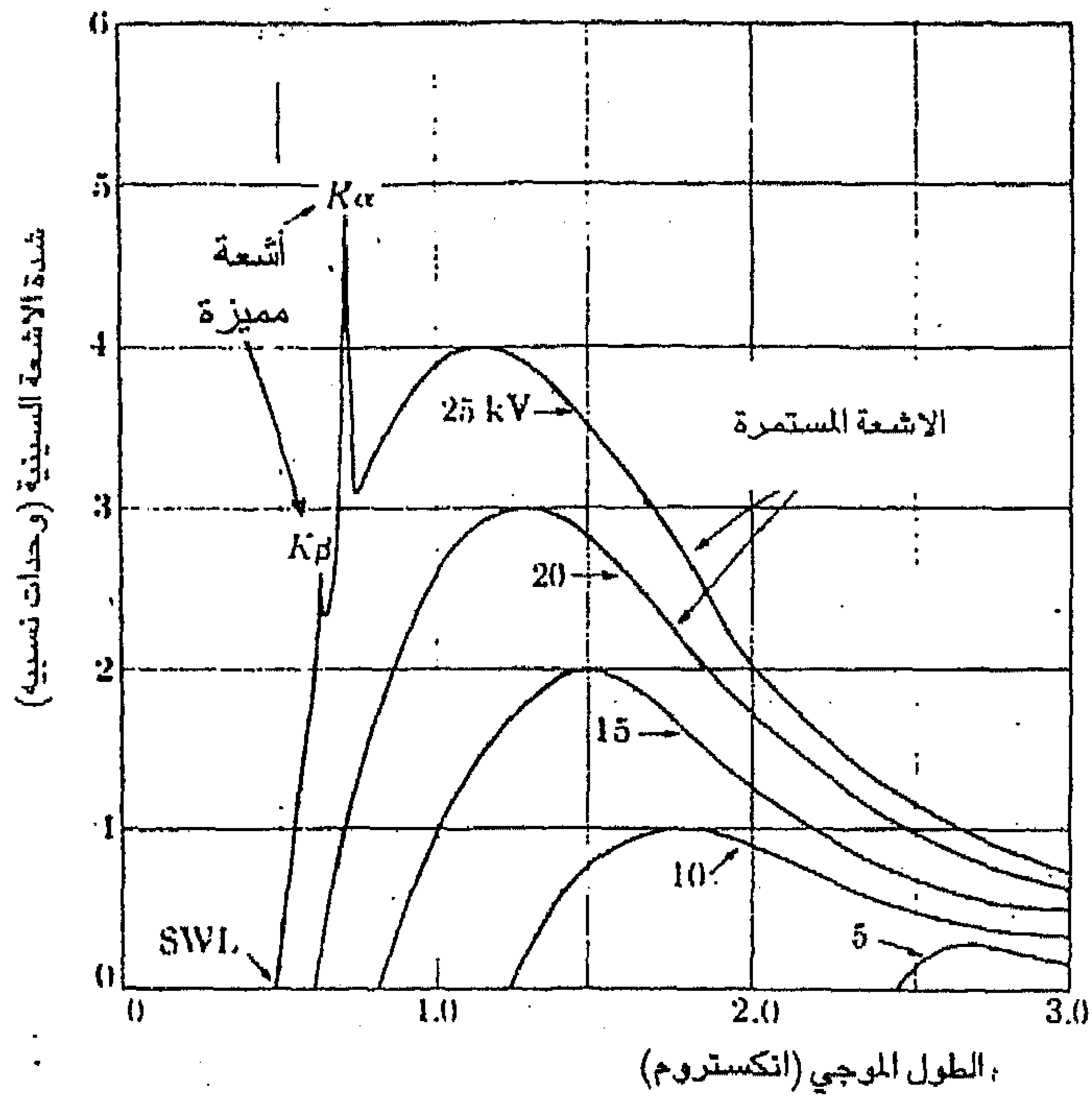
$$eV = h\upsilon_{max} = h \frac{C}{\lambda_{min}} \qquad ..................(3-4)$$

أو

$$\lambda_{swl} = \lambda_{min} = \frac{hC}{eV}$$

وعند التعويض عن كل الثوابت نحصل على العلاقة 1 – 2 وهي :

$$\lambda_{swl} = \frac{12400}{V}$$




الشكل 4–1 طيف الأشعة السينية لهدف من المولوبدنوم

كدالة للفولتيه المعجلة.

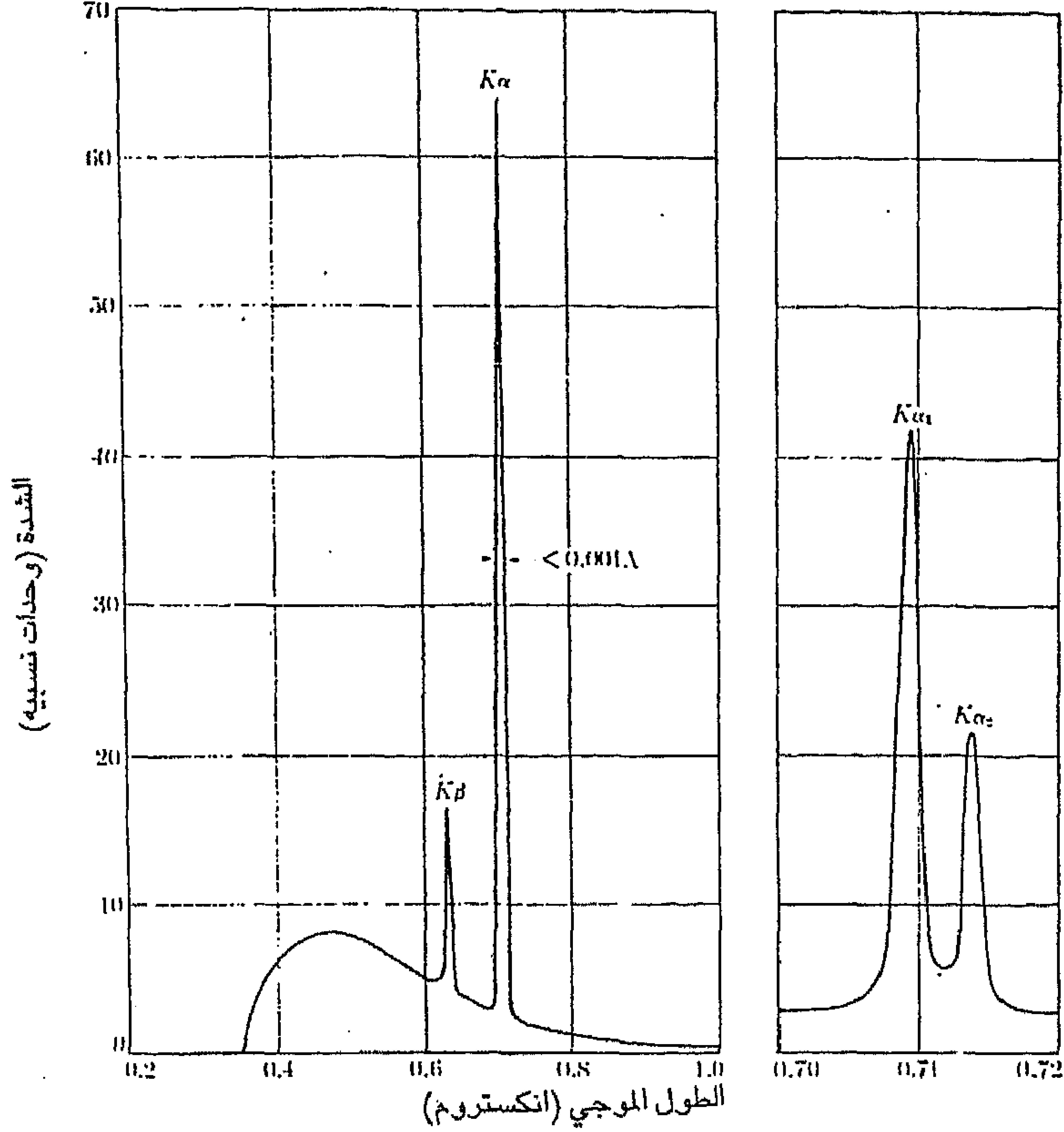
عندما تكون وحدات $\lambda_{swl}$ بالانكستروم (Å) ووحدات V هي الفولت. لاتفقد الالكترونات، بشكل عام، طاقتها عند اول صدمة مع ذرات الهدف وانما تعمل عدة صدمات قبل ان تفقد طاقتها بصورة تامة. لذلك فإن الطول الموجي في المعادلة (1-2) اعلاه يمثل أقصر طول موجي يمكن الحصول عليه. حيث توجد اطوال موجبة كثيره جداً في طيف الاشعة المنبعثة ناتجة من تحول جزء من طاقة الإلكترون الصادم الى أشعة عند كل صدمة حتى فقدان جميع طاقته بصدمات متعاقبة.

أما عند زيادة الفولتيه المعجلة في الانبوبة عن حد ثابت (حسب معدن الهدف) فتبرز عند ذلك قمم حادة ذات اطوال موجية ثابتة تعتمد على طبيعة ذرات معدن الهدف (الشكل 4-2)، بحيث ان كل نوع من الذرات تبعث أشعة تختلف في الطول الموجي والشدة عن الذرات الاخرى ، ولذلك سمي هذا الجزء من الطيف بالأشعة السينية المميزة (اي مميزه لنوع عنصر الهدف)، وبسبب هذه الخاصية امكن استخدام الاشعة السينية كأداة كاشفة لنوع العنصر.

يتولد الطيف المميز عند اصطدام الالكترونات المعجلة (السريعة) بالكترونات المدارات الداخلية لذرة الهدف وعليه فمن المحتمل ان تكتسب بعض الالكترونات المدارية طاقة اكثر من الطاقة التي تربطها الى ذراتها وبذلك تترك الذرة.

يبقى مكان هذه الالكترونات خالياً ولذا قد ينتقل الكترون من المدارات الخارجية (الأكثر بعداً عن النواة) ليحتل مكان الكترون مفقود. ان الفرق في الطاقة لمستوى هذا الالكترون المنتقل من المدار الخارجي والمستوى الذي انتقل اليه (المدار الداخلي) ينبعث على هيئة اشعة سينية مميزة (characteristic X - rays) خارج الذرة. وإذا فرض ان E تمثل الفرق في الطاقة بين المدارين عندئذٍ يكون طول موجة الاشعة المنبعثة هو :

$$\lambda = \frac{hC}{E}$$

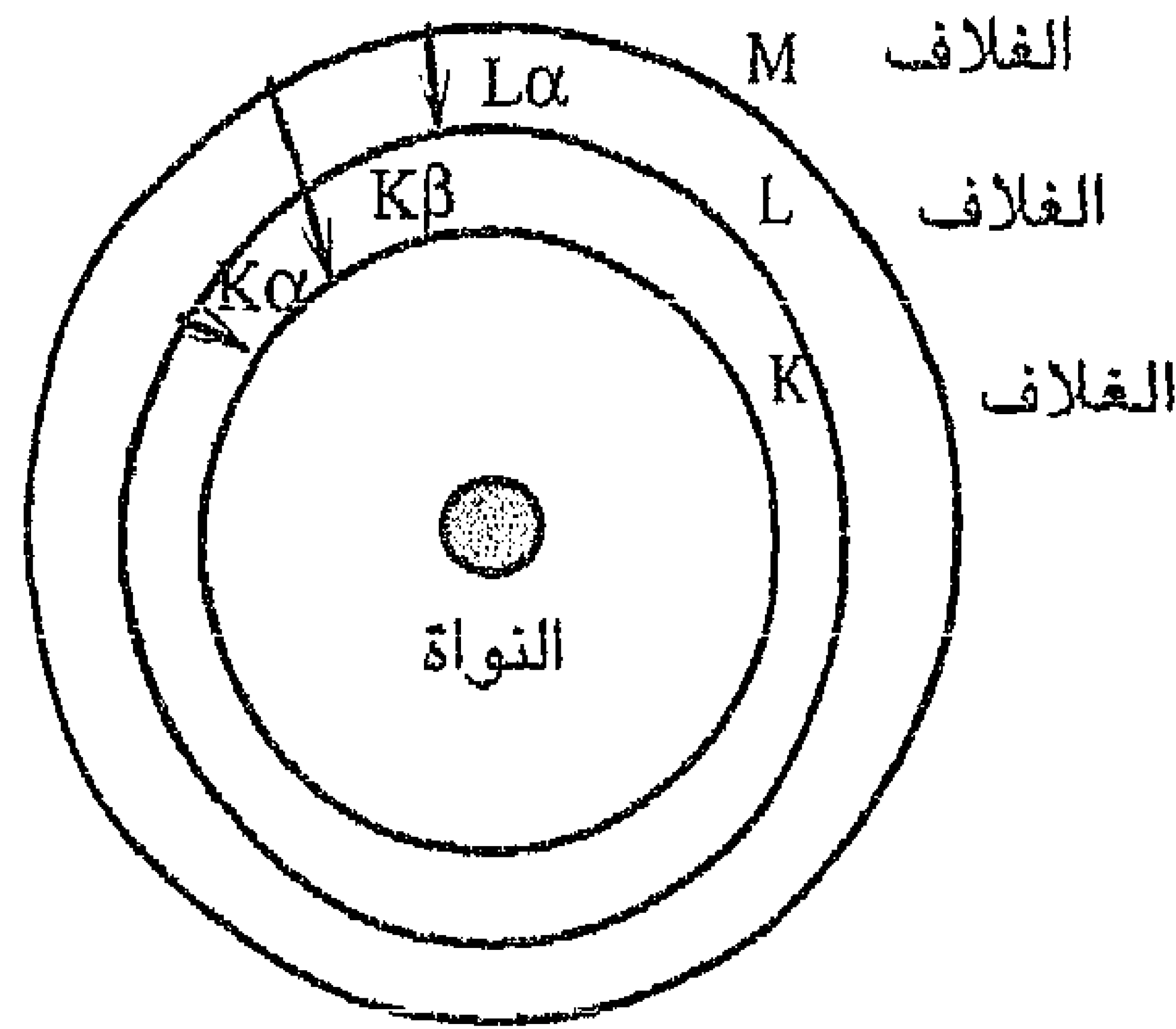



الشكل 4-2 طيف عنصر المولوبدنوم عند فولتيه مقدارها 35kV بصورة تخطيطية. الشكل على جهة اليمين يبين خطى kα بصورة منفصلة على تدريج مكّبر للطول الموجي

حيث أن قيمة E تختلف باختلاف ذرة العنصر لذلك يكون طول موجة الأشعة المنبعثة معتمداً على نوع العنصر.

تأخذ E قيماً مختلفة محدده لذرة معينة، اعتماداً على المدارات التي تنتقل بينها الكترونات الذرة وبذلك تولد طيفاً مميزاً له أطوال موجية معينة و منفصلة عن بعضها بقدر فرق الطاقة بين الكترونات المدارات لتلك الذرة.

يبين الشكل (4-3) فكرة توليد الأشعة السينية المميزة نتيجة لإنتقال الالكترونات من مدار الى آخر.




**الشكل4-3 تخطيط يمثل الانتقال الالكتروني في الذرة.**

**عمليات انبعاث الأشعة السينية مؤشرة بالأسهم.**

تدعى الأشعة السينية الناتجة عن احتلال الكترون من المدار L مكان الكترون في المدار K بـ Kα وعند احتلال الكترون من المدار M محل الكترون في المدار K فتدعى الأشعة السينية Kβ وبما أن احتمالية حدوث الظاهرة الاخيرة اقل من الأولى لذا كانت شدة Kα أكبر بكثير من شدة Kβ . وحيث ان الفرق بين طاقة الكترونات المدار M والكترونات المدار K اكبر من الفرق بين طاقة الكترونات المدار L والكترونات المدارK لذا كان الطول الموجي لأشعة Kβ أقصر مما هو عليه في أشعة Kα. وهناك أشعاعات مميزة أخرى سوف لن يتم التطرق اليها لعدم اهميتها في موضوع حيود الأشعة السينية:

## ٣-٤ امتصاص الأشعة السينية:

يتم توهين الأشعة السينية عند مرورها خلال سمك معين من المادة. يتم الامتصاص نتيجة لتفاعل هذه الأشعة مع ذرات المادة او بالأحرى مع الكترونات ذرات المادة. وقد دلت التجارب ان نقصاناً نسبياً في شدة الاشعة (I)، عند مرورها

خلال اي مادة متجانسة، يتناسب مع المسافة التي تقطعها في المادة (X) (أو مع السمك) اي أن

$$-\frac{dI}{I} = \mu dx \qquad \text{.................(4-4)}$$

$\mu$ هو ثابت التناسب ويدعى معامل الامتصاص الخطي ويعتمد على نوع المادة وكثافتها والطول الموجي للأشعة السينية. ويمكن كتابة المعادلة اعلاه بعد التكامل بنفس صيغة المعادلة (1-3) اي ان

$$I_x = I_o e^{-\mu x}$$

Io: شدة الأشعة الساقطة و Ix شدة الأشعة النفاذة من المادة بعد مرورها خلال سمك مقداره x . وحيث ان معامل الامتصاص الخطي يعتمد على الكثافة ($\rho$)، كواحد من العوامل التي يعتمد عليها ، لذلك كانت الكمية $\frac{\mu}{\rho}$ ثابت من ثوابت المادة لايعتمد على الحالة الفيزياوية (صلب او سائل او غاز). ويدعى المقدار الاخير معامل امتصاص الكتلة ، وهو المقدار الذي يذكر في الجداول عادة. ويمكن كتابة المعادلة الاخيرة اذن كالآتي:

$$I_x = I_o e^{-(\frac{\mu}{\rho})\rho x} \qquad \text{..............(5-4)}$$

ومن الضروري احياناً معرفة معامل امتصاص الكتلة لمادة تحتوي على أكثر من عنصر. يكون معامل امتصاص الكتلة مساوياً لمعدل الوزن النسبي لكل العناصر المكونه للمادة بغض النظر عن كون المادة خليط ميكانيكي او محلول او مركب كيماوي وفيما اذا كانت بحالتها الصلبه او السائلة او الغازية. فإذا فرضنا ان $\omega_1$ و $\omega_2$ و ... هي الاوزان النسبية للعناصر 1 و 2 و... الموجودة في المادة ، وأن $(\frac{\mu}{\rho})_1$ و$(\frac{\mu}{\rho})_2$ و ... هي معاملات امتصاص الكتلة لهذه العناصر فيكون معامل امتصاص الكتلة للمادة هو $\frac{\mu}{\rho}$ اي ان:

$$\frac{\mu}{\rho} = \omega_1 (\frac{\mu}{\rho})_1 + \omega_2 (\frac{\mu}{\rho})_2 + \text{................(6-4)}$$

يعطي الأسلوب الذي يتغير به معامل الامتصاص مع الطول الموجي المفتاح لفهم

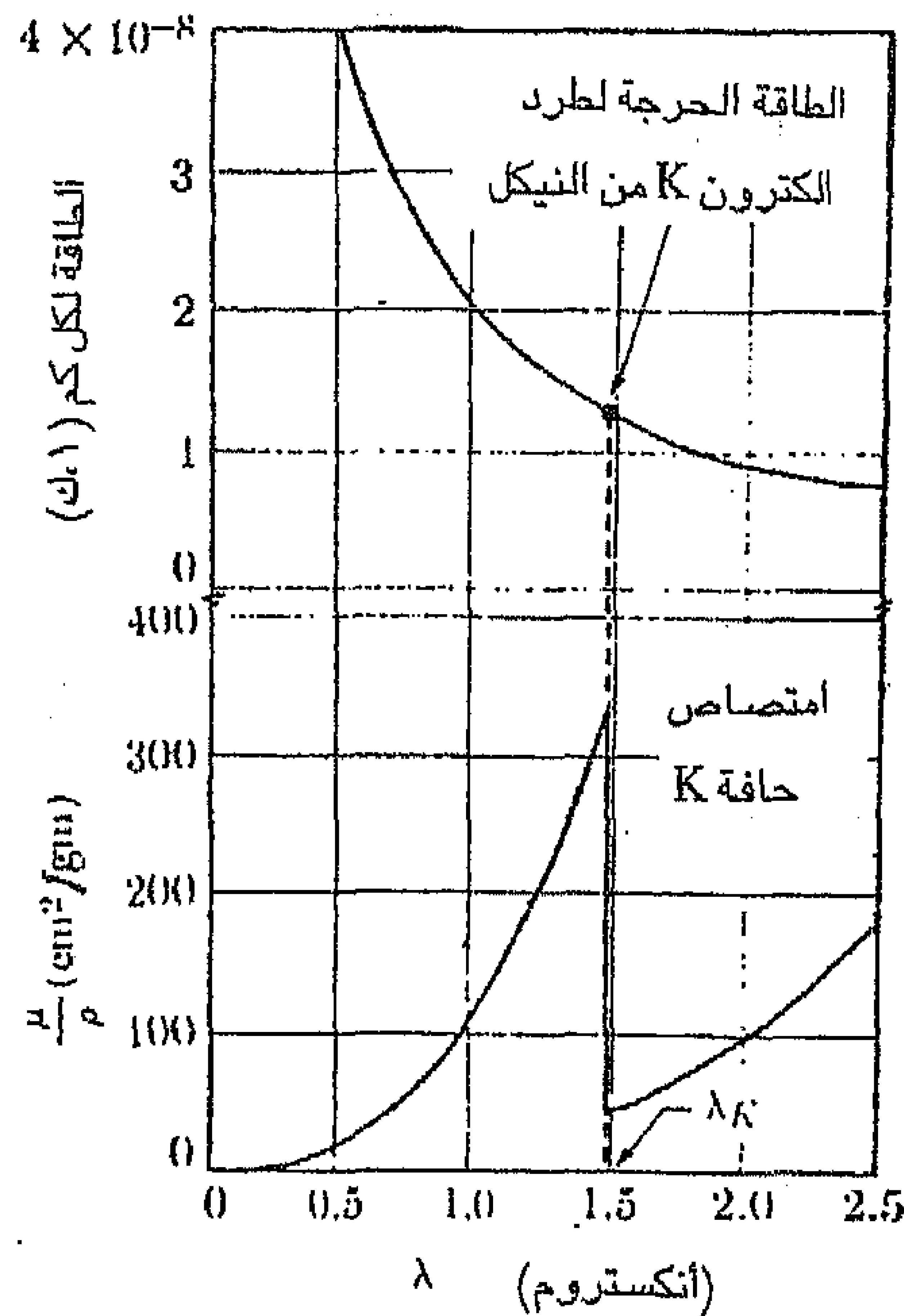
عملية تفاعل الاشعة السينية مع الذرات . يبين الشكل (4-4), القسم الاسفل، تغير معامل امتصاص الكتلة للنيكل كما دة ممتصة مع الطول الموجي وهذا الشكل نموذجي لكل المواد، يتألف المنحنى في الشكل (4-4) ، من جزئين متناظرين مفصولين بتغير حاد يدعى حافة الامتصاص (absorption edge). يتغير معامل امتصاص الكتلة وبشكل تقريبي مع الطول الموجي في كل من جزئي المنحني كالآتي:

$$\frac{\mu}{\rho} = k\,\lambda^3 Z \qquad \text{.................(7-4)}$$

k: ثابت تتغير قيمته لكل من جزئي المنحنى

Z: العدد الذري للمادة الماصة.

لذلك تكون الأشعة ذات الطول الموجي القصير اكثر قابلية على الاختراق وتسمى الاشعة السينية الشديدة (hard) في حين يتم امتصاص الاشعة السينية ذات الطول الموجي الطويل بسهولة وتسمى الضعيفة (Soft) .




الشكل (4-4) تغير طاقة فوتون الاشعة السينية ومعامل امتصاص الكتلة للنيكل مع الطول الموجي.

تمتص المادة الأشعة السينية بأسلوبين متميزين :

١- بالاستطاره Scattering

٢- بالإمتصاص الحقيقي True absorption

يمثل معامل امتصاص الكتلة للمادة $\frac{\mu}{\rho}$ مجموع الإمتصاص بالأسلوبين تتشابه استطارة الاشعة السينية بالذرات من عدة وجوه مع استطارة الضوء المرئي بدقائق الغبار في الهواء، حيث يحدث ذلك في كل الاتجاهات.

تعني الاستطارة اذن بالنسبة للأشعة السينية نقصاناً في قيمة الشدة بالإتجاه الأساس (اتجاه الشعاع الساقط) . اما الامتصاص الحقيقي فسببه الانتقال الالكتروني بين مدارات الذرة. وهو مشابه تماماً لما يحدثه الكترون عالي الطاقة عند اصطدامه بأحد الالكترونات المدارية الداخلية، على سبيل المثال الكترون المدار (K) ، فيطرده خارج الذره ليؤدي الى انبعاث اشعة سينية مميزة. لذا يمكن ان يحدث الشيء نفسه عند سقوط فوتون الاشعة السينية بشرط ان يمتلك طاقة تعادل اقل طاقة كافية ($w_k$)لطرد الالكترون من مداره . اي أن

$$w_k = h\upsilon_k = \frac{hC}{\lambda_k} \qquad \text{......................(8-4)}$$

$\lambda_k$ تسمى حافة امتصاص المدار K .

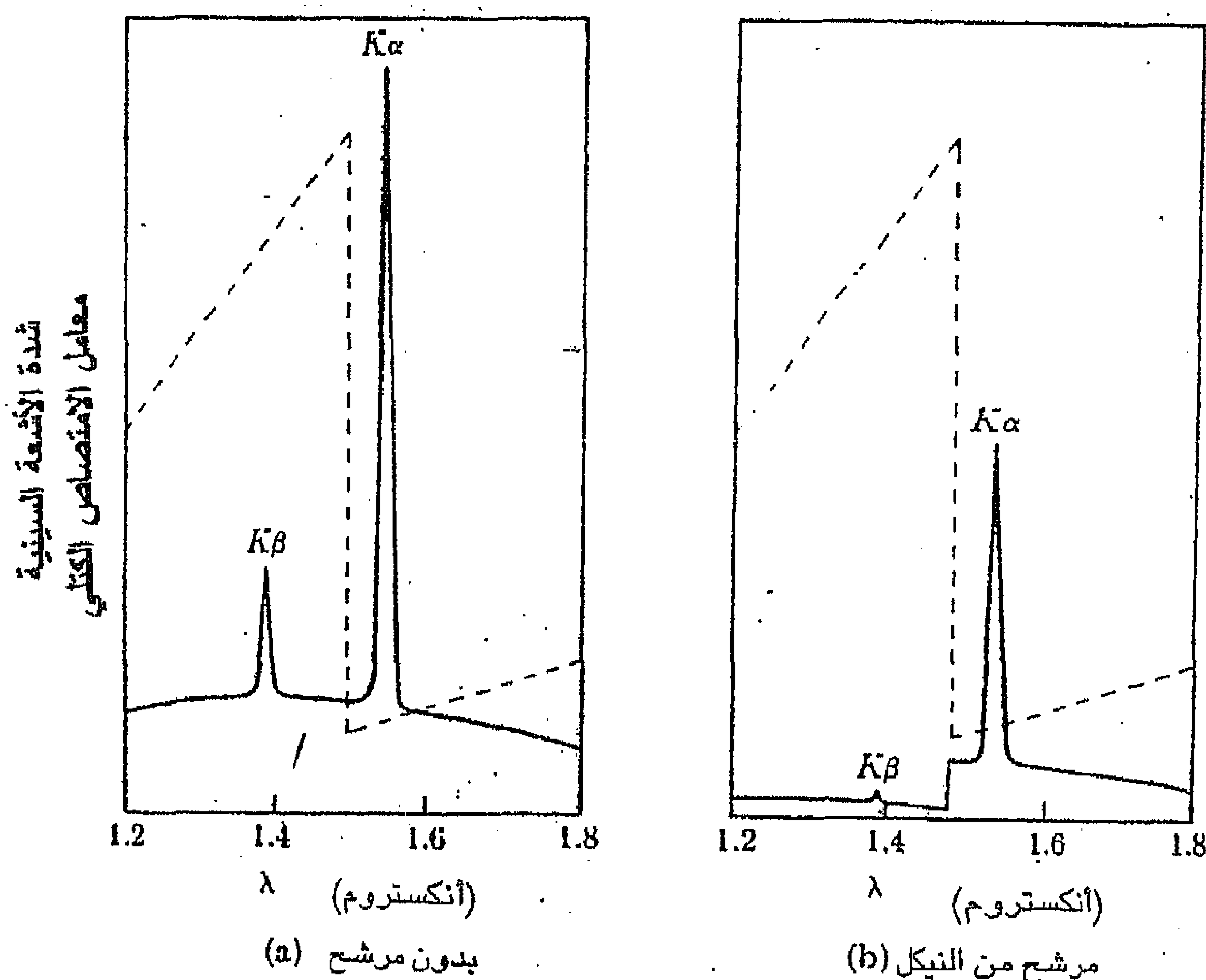
## ٤-٤ ترشيح الاشعة السينية:

نحتاج في دراسة الحيود الى أشعة أحادية الطول الموجي غالباً (Mono-chromatic Radiation) وذات شدة عالية نسبياً ومن هنا جاءت فكرة استعمال المرشح (Filter) للحصول بصورة عملية على مثل هذه الأشعة.

والمرشح عبارة عن صفيحة من مادة محددة لها علاقة بطبيعة مادة هدف (target) أنبوبة الأشعة التي تتكون عنده الاشعة السينية وللمرشح سمك معين ايضاً بحيث لاتنخفض شدة الأشعة كثيراً بعد مرورها بالمرشح.

يبين الشكل (5-4) جزء من طيف الأشعة السينية لهدف من النحاس (a) وقد استعمل النيكل كمرشح في (b). يمثل الخط المنقط تغير معامل امتصاص الكتلة للنيكل مع الطول الموجي.

ويشترط في مادة المرشح ان تكون حافة امتصاص K لمعدن المرشح واقعة بين طولي موجة اشعة القمتين $K\beta$ و $K\alpha$ لمعدن الهدف. اي يكون الطول الموجي لحافة امتصاص K للمرشح اقصر من الطول الموجي للقمة $K\alpha$ وأطول من الطول الموجي للقمة $K\beta$ . كما ان العدد الذري لمادة المرشح يقل بواحد عن العدد الذري لمعدن الهدف.




**الشكل (5-4) مقارنة بين طيف أشعة النحاس (a) قبل عملية الترشيح و (b) بعد مرور الاشعة خلال مرشح من النيكل. يمثل الخط المنقط معامل امتصاص الكتلة للنيكل.**

يلاحظ من الشكل (4-5) ان العدد الذري للهدف (النحاس) هو (29) والعدد الذري للمرشح (النيكل) هو (28) . كما يلاحظ ان نسبة شدة الخط (القمة) Kβ الى شدة الخط (القمة)Kα قد قلت من $\frac{1}{9}$ تقريباً الى $\frac{1}{500}$ بعد عملية الترشيح اي اننا حصلنا تقريباً على أشعة احادية الطول الموجي. ومن الجدير بالذكر ان شدة الخط Kα هي الأخرى قلت بحدود النصف بعد مرورها بالمرشح وهذا شيء غير مرغوب فيه طبعاً،لكنه لايمكن تفاديه.

وإذا لم يمكن الحصول على رقيقة لمعدن المرشح المطلوب فيمكن استخدام اوكسيد ذلك المعدن وعلى شكل مسحوق يخلط بمادة رابطة وينشر على ورقة. يبين الجدول (4-1) بعض معادن الاهداف المستخدمة في انابيب الأشعة السينية عادة وسمك معادن المرشحات الملائمة لها.

جدول (4-1) مرشحات لمنع مرور أشعة Kβ

| معدن الهدف | معدن المرشح | النسبة $\frac{I(K\alpha)}{I(K\beta)}$ للأشعة الساقطة | سمك المرشح الذي يجعل $\frac{I(K\alpha)}{I(K\beta)}=\frac{500}{1}$ في الاشعة النافذ منه mm | mg/cm$^2$ | النسبة $\frac{I(K\alpha)\ \text{للنافذة}}{I(K\alpha)\ \text{للساقطة}}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Mo | Zr | 5.4 | 0.115 | 77 | 0.29 |
| Cu | Ni | 7.5 | 0.020 | 18 | 0.42 |
| Co | Fe | 9.4 | 0.017 | 14 | 0.46 |
| Fe | Mn | 9.0 | 0.017 | 12 | 0.48 |
| Cr | V | 8.5 | 0.015 | 10 | 0.49 |

## ٥-٤ أنبوبة الأشعة السينية:

لقد تم التنويه عن كيفية توليد الأشعة السينية بصورة مقتضبة فيما سبق وأنها تتولد عندما تصطدم الكترونات عالية السرعة (معجلة) بهدف معدني. وبناء على ذلك فيجب ان تشتمل اي انبوبة لتوليد الأشعة السينية على الآتي:

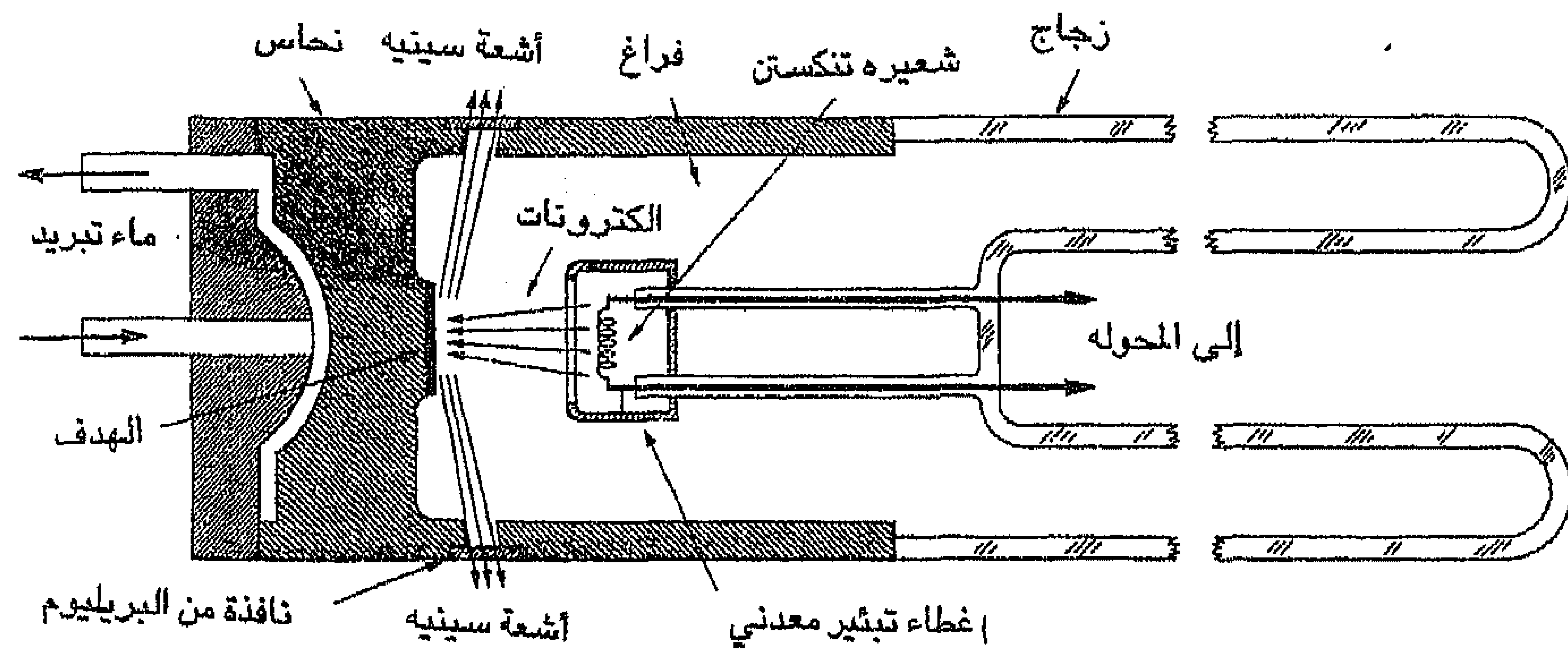
أ- مصدر لإطلاق الإلكترونات.

ب- فرق جهد عالي لتعجيل الالكترونات.

جـ- هدف معدني.

وبما أن معظم الطاقة الحركية للإلكترونات تتحول الى حرارة عند الهدف، فيجب ان يتم تبريد الاخير بوسيلة ما، وعادة يكون التبريد بالماء ،لمنع انصهاره. تحتوي جميع أنابيب الأشعة السينية على قطبين هما المصعد (anode) (وهو الهدف المعدني) والمهبط (cathode) ويكون فرق الجهد بينهما عالياً اي بحدود 30000 الى 50000 فولت لأغراض الحيود.

تحتوي انبوبة الأشعة السينية المألوفة على شعيره(filament) فيتم تسخين هذه الشعيرة لتزويد الانبوبة بالإلكترونات . يبين الشكل (4-6) مقطع تخطيطي في مثل هذه الأنبوبة (الخاصة بالحيود) حيث تلاحظ الاجزاء الاساسية فيها.




**الشكل (4-6) مقطع تخطيطي لأنبوبة الأشعة السينية.**

## ٦–٤ الكشف عن الأشعة السينية:

هناك ثلاث وسائل للكشف عن هذه الأشعة هي:

### أ– الشاشة المتألقة :

وتستخدم في هذه التقنية صفيحة مطلية بمادة متألقة كمادة كبريتيد الخارصين (Zinc sulfide) تحتوي كمية قليلة من النيكل. فعند سقوط الاشعة السينية عليها تتألق هذه المادة، اي تبعث اشعة مرئية، وفي حالة كبريتيد الخارصين يكون الضوء اصفر. ومع ان هذه الطريقة ليست ذات فائدة كبيرة في الكشف عن حزم الأشعة السينية الضعيفة إلا أنها مفيدة جداً في ضبط وتقويم الحزمة الرئيسية للأشعة المنبعثة من الجهاز.

### ب– أفلام التصوير:

تستخدم أفلام خاصة بالأشعة السينية لتسجيل نمط الحيود ومن ثم استخراج المعلومات المطلوبة. تختلف تقنية تصنيع هذه الأفلام عن افلام التصوير الاعتيادي. تعتمد درجة تأثر الفلم بالأشعة لتكوين الصورة على طول موجه الأشعة. يمكن من هذا ان نستنتج ان هناك انواعاً مختلفة من الأفلام، يعتمد استخدام اياً منها على ظروف التجربة وخواص الاشعة السينية المستخدمة .

### جـ– العدادات Counters

وهي عبارة عن الأجهزة التي تحول الاشعة السينية الى تيار كهربائي نبضي . يتناسب عدد هذه النبضات الكهربائية بوحدة الزمن مع شدة الأشعة السينية الداخلة الى العداد. تستخدم في الوقت الحاضر ثلاث أنواع من العدادات هي:

١– العدادات التناسبية Proportional Counters

٢– العدادات الوميضية Scintillation Counters

٣– عدادات شبه الموصلات Semi conductor counters

## ٧-٤ احتراسات الوقاية من الأشعة السينية:

هناك نوعان من أنواع المخاطر قد يتعرض لها العاملون في مجال الأشعة السينية هما:

أ- مخاطر الصعقة الكهربائية الناتجة من العمل عند فولتيه تعجيل عاليه. من الممكن التقليل من شأن هذا الخطر بتصميم المعدات بصورة سليمة وذات تقنية عالية، كما أن الحذر والحيطة من قبل العاملين ضروريان أيضاً لتحاشي مثل هذا الخطر.

ب- مخاطر التعرض لجرعات عالية من الأشعة . لايوجد عند الإنسان حاسة لتحسس مثل هذه الأشعة (كالأشعة السينية وأشعة كاما والأشعة فوق البنفسجية وغيرها) حيث انها أشعة مؤينة اي أنها تقتل الخلايا الحية، ولذا تتم مراقبة العاملون في هذا المجال بفحص الدم بصورة دورية للكشف عن كريات الدم البيضاء لأن تعرض الجسم لجرعة عالية تفوق المسموح به سيقتل هذه الكريات ومن ثم يقل عددها . تستخدم هذه الأشعة ايضاً في علاج خلايا السرطان والأورام الخبيثة الأخرى.

# تمارين الفصل الرابع

١- ماهو تردد وطاقة الفوتون الواحد للاشعة السينية ذات الطول الموجي $1.54\mathring{A}$ (Cukα) و $0.71\mathring{A}$(Mokα)

٢- احسب سرعة الإلكترون وطاقته الحركية في أنبوبة الأشعة السينية عند فرق جهد معجل قدره 50kV. وما هو حد الطول الموجي القصير ($\lambda_{swl}$) .

٣- تستخدم الحواجز الرصاصية بكثره لوقاية العاملين من الاشعة في مختبرات الاشعة السينية وتكون عادة بسمك (1mm)، احسب معامل الاختراق ( $\frac{I}{I_o}$ ) لهذه الحواجز في حالة الاشعة Mokα($0.71\mathring{A}$) .

٤- صفيحة من الألمنيوم ذات سمك (1mm) ، تقلل شدة الاشعة السينية المخترقة لها 23.9% من قيمتها الاصلية . ماهو الطول الموجي للاشعة السينية هذه.

٥- ادى استخدام مرشح من النيكل في انبوبة الاشعة السينية ذات هدف من النحاس، الى الحصول على نسبة شده بين ICu kα الى ICu kβ مقدارها( $\frac{100}{1}$ ) للأشعة النافذة من المرشح، احسب سمك المرشح ومعامل الاختراق( $\frac{I}{I_o}$ ) للخط Cukβ. إذا علمت ان ( $\frac{\mu}{\rho}$ ) للنيكل لهذا الخط (Cu kβ) يساوي $286\ cm^3/g$.

# الفصل الخامس

# حيود الأشعة السينية

# X - Ray diffraction

## ١-٥ المقدمة:

لقد تم استعراض خواص الأشعة السينية اضافة الى هندسة البلورات بصورة مقتضبة والآن يمكننا الربط بين الاثنين ودراسة حيود الأشعة السينية والذي يعتبر التفاعل بين الإثنين. ومن خلال المعرفة المتراكمة حول البلورات وخاصة من قياس الزوايا بين سطوحها والتحاليل الكيماوية إضافة الى الخواص الفيزياوية امكن الحدس بان البلورات متكونة من وحدات (ذرات او جزيئات) منتظمة الترتيب ومكررة وأن المسافة البينيه بحدود (1Å) ، بالرغم من قلة المعلومات عن البنية الداخلية لها في ذلك الوقت كما أنه في الوقت نفسه كانت هناك بعض الإشارات بأن الأشعة السينية هي اشعة كهرومغناطيسية في طبيعتها وان طولها الموجي بين 1 الى2Å . وفي نفس الوقت كانت ظاهرة حيود الضوء عند مروره في محزز (grat-ing) المسافة بين فتحاته تقارب الطول الموجي للضوء مفهومه بشكل جيد.

لقد تناول الفيزياوي الألماني فون لاوا (Von Laue) سنة 1912 هذه المسألة عندما قال اذا كانت البلوره فعلاً متكونة من ذرات منتظمة الترتيب فيمكن أن تكون مراكز لاستطارة الاشعة السينية وإذا كانت الاشعة السينية ذات طبيعة كهرومغناطيسية وأن طولها الموجي يساوي تقريباً المسافة البينية للذرات في البلورة عندئذ يمكن ان تحاد الأشعة السينية بوساطة البلورات.

لقد تم اجراء تجارب لملاحظة حيود الاشعة السينية واستخدمت بلورات كبريتات

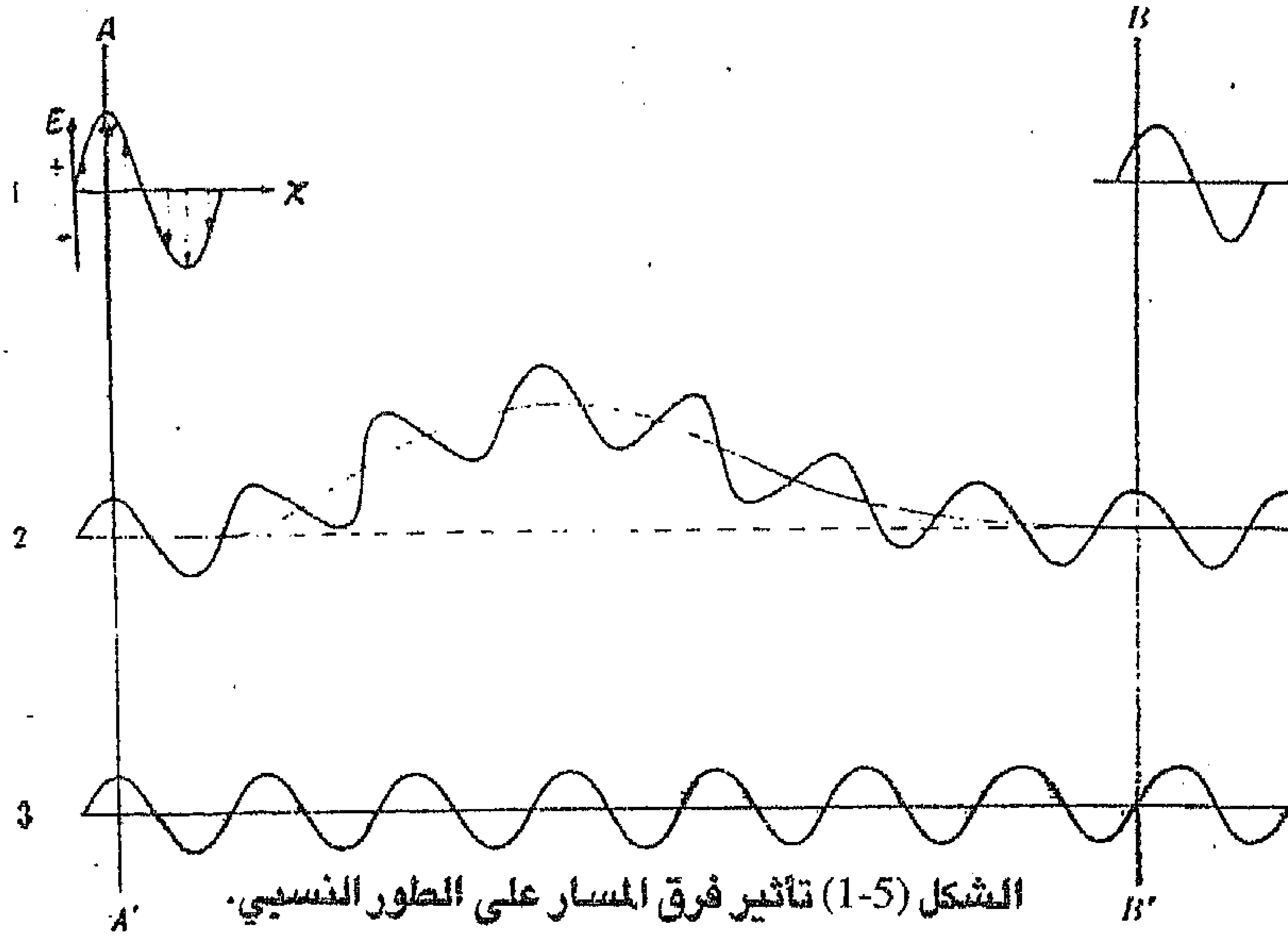
النحاس مع حزمة ضيقة من الأشعة السينية وعلى لوح تصوير (فوتوغرافي). وفعلاً نجحت بعض هذه التجارب وتم تسجيل نمط حيود الأشعة السينية بشكل لايقبل الشك وبذلك تم اثبات ان الأشعة السينية ذات طبيعة كهرومغناطيسية وأن الذرات مرتبة بشكل منتظم ومعاد في البلورات.

لقد وضع العالم الانكليزي براك (Bragg) وابنه الشروط الخاصة بالحيود بشكل رياضي بسيط. لقد حددا البنى البلوريه لعدة بلورات على سبيل المثال، NaCl و KBr ، KI والتي كانت ذات بنيه واحدة هي بنية NaCl وتعتبر هذه اول دراسة كاملة لتعيين بنى البلورات.

ازدادت فيما بعد تطبيقات الحيود واستخدمت في مجالات عدة كهندسة المعادن والمواد وفيزياء الحالة الصلبة والكيمياء وغيرها.

## ٢-٥ الحيود Diffraction:

يحدث الحيود عندما يكون هناك فرق في الطور (phase differene) بين موجتين او أكثر تنتشران في نفس الاتجاه تقريباً. ومن المهم أخذ فكرة ولو بسيطة عن العلاقات الطورية بين الموجات. لنتأمل حزمة من الأشعة السينية مثل الحزمة (الموجه)(1) في الشكل (5-1) والمنتشرة من اليسار الى اليمين. ،لنفترض ، للتبسيط، ان الحزمة مستوية ومستقطبة ليمكننا رسم متجه المجال الكهربائي للموجه (E) دائماً في مستوٍ واحد. يمكن ان نتصور ان هذه الحزمة متكونة من جزئين متساويين ، الشعاع2 والشعاع 3 ، لكل منهما نصف سعة الحزمة 1. ويقال لهذين الشعاعين انهما في حالة طورية متطابقة (in phase) تماماً عند جبهة الموجة (wave front) AA` ، اي ان متجهي مجالهما الكهربائي لهما نفس القيمة والاتجاه عند اي لحظة واية نقطة على المحور $\chi$ عند قياسهما باتجاه انتشار الموجه. تعرف جبهة الموجه بأنها السطح العمود على اتجاه انتشار الموجه.



الشكل (5-1) تأثير فرق المسار على الطور النسبي.

تصور الآن ان الشعاع 3 سار بخط مستقيم لكن الشعاع 2 انحرف بطريقة ما وسار بخط منحني قبل ان يلتقي بالشعاع 3 . لنتفحص الحالة الطورية عند جبهة الموجه `BB ، فالمتجه الكهربائي للشعاع 2 عند قيمته العظمى عند اللحظة المبينه، لكنه يساوي صفراً بالنسبة للشعاع 3 . اذن فالشعاعين لهما طورين مختلفين اي ان في طورهما اختلاف (out of phase) . فإذا تم جمع هاتين المركبتين ( 2 و 3 ) فسنجد ان الحزمة 1 لها الحالة المبينه على الجهة العليا اليمنى من الشكل.فإذا كانت سعة كل من الشعاعين 2 و 3 لهما قيمة مقدارها وحدة واحدة فسعة الحزمة 1 عند اليسار لها وحدتين اثنتين وأن سعتها عند حالتها في الجهة اليمنى 1.4 من الوحدات اذا كانت E تتغير جيبياً مع المحور x .

ومما تقدم يمكن استنتاج الآتي:

١- يؤدي الفرق في طول مسارات الأشعة الى فرق في الطور.

٢- يؤدي الفرق في الطور الى فرق في سعة موجة الأشعة.

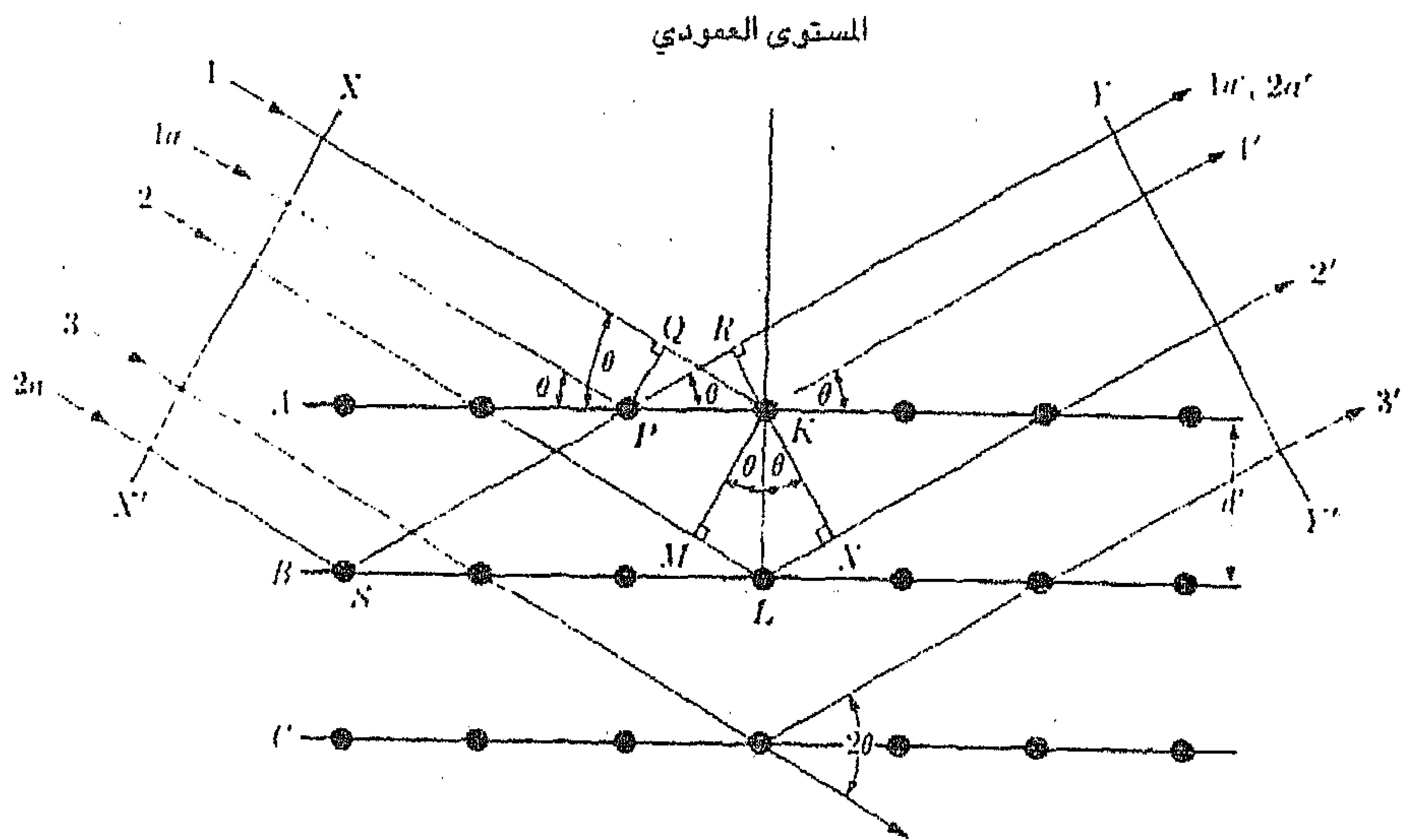
كلما كان الفرق في المسار أكبر كان الفرق في الطور أكبر، وحيث ان الفرق في المسار، والذي يقاس بالطول الموجي، يساوي تماماً الفرق في الطور فإنه يقاس بالطول الموجي أيضاً. ولو فرضنا ان المسار المنحرف للشعاع 2 في الشكل (5-1) أطول بمقدار ربع الطول الموجي مما هو مبين في الشكل، لكان الفرق في الطور نصف الطول الموجي . فيكون الشعاعان 2 و 3 في حالة عدم توافق طوري تماماً عند جبهة الموجه `BB وبعدها. وهكذا سوف يمحو كل منهما الآخر، لأن المتجه الكهربائى لكل منهما اما أن يكون صفراً أو لهما نفس المقدار ولكن باتجاهين متعاكسين. أما إذا كان مقدار الفرق في مساري الموجتين اكثر مما هو مبين في الشكل بثلاثة أرباع الطول الموجي فسيكون الفرق الطوري بين الشعاعين بمقدار طول موجي واحد تماماً، وهي الحالة التي تتطابق تماماً مع مالو كان الشعاعان في حالة تطابق طوري تام لأن الموجتين في كلا الحالتين سوف تتحدان لتكوين شعاع سعته وحدتين اثنتين تماماً مثل الشعاع الأساس. يمكن الاستنتاج ان الشعاعين يكونان في حالة تطابق طوري تام كلما كان الفرق في طول مساريهما صفراً او عدداً صحيحاً من الأطوال الموجيه.

تنشأ بصوره طبيعية الفروق في اطوال مسارات الأشعة عندما نتأمل الكيفية التي تحيد بها البلوره الأشعة السينية . يبين الشكل (5-2) مقطع في بلوره تترتب ذراتها على مجموعة من المستويات المتوازية A و B و C وD ...... والتي تكون عمودية على مستوى الورقة ومسافتها البينيه (d) . وعلى فرض ان الأشعة السينية متوازية تماماً وذات طول موجي احادي هو (λ) وساقطة على البلورة بزاوية مقدارها(θ) تدعى زاوية براك (Bragg angle) وهي الزاوية المتولدة بين الشعاع الساقط ومستوى البلورة المحدد.

والمطلوب الآن معرفة هل أن هذه الأشعة سوف تحاد من قبل البلوره وتحت أية ظروف يحدث الحيود. يمكن تعريف الشعاع المحاد بأنه الشعاع المتكون من عدد

كبير من الاشعة المستطارة في الأساس ولايتضمن اي تفاعل جديد بين الذرات والأشعة السينية، وبما ان الذرات تستطير الاشعة السينية في كل الاتجاهات، فسوف يتضح فيما بعد ان حزم الاشعة المستطارة في بعض الاتجاهات ستكون في حالة تطابق طوري تام وستقوي كل واحدة منهما الاخرى لتوليد الحزم المحادة.

ان ا لشعاع المحاد المتولد في الظروف المبينه في الشكل (5-2) هو الشعاع الذي تكون زاوية الانعكاس بينه وبين مستوى البلورة (θ) والتي تساوي زاوية السقوط.




**الشكل (5-2) حيود الأشعة السينية بواسطة بلوره.**

لو تأملنا الآن الشعاع 1 و 1a في الحزمة الساقطة، فإنهما ستصدمان الذرتين K و P في المستوى الأول للذرات ومن ثم تستطير في كل الاتجاهات ستكون الحزم المستطيرة في الاتجاهين \`1a و \`1 فقط في حالة تطابق طوري تام ويمكنها ان

تقوي أحداهما الآخرى، لان الفرق في طول مساريهما بين الجبهتين `XX و `YY يساوي صفراً اي ان

$$QK - PR = PK \cos \theta - PK \cos \theta = O$$

وهكذا يكون حال كل الحزم المستطارة من قبل الذرات في المستوى الأول وفي الاتجاه الموازي للشعاع (`1) ومن ثم تتحد لتكون الحزمة المحادة. وينطبق هذا على كل المستويات بصوره منفصلة وتستطير الذرتان K و L ، على سبيل المثال، الشعاعين 1 و 2 والفرق بين مساري الشعاعين (`1K1) و (`2L2) هو:

$$ML+LN = d \sin \theta + d \sin \theta \qquad \text{................(1-5)}$$

وهو نفس الفرق في المسار بين الشعاعين المستطارين من قبل الذرتين S و P وفي الاتجاه المبين لأنه لايوجد فرق في طول المسار للأشعة المستطارة من قبل الذرات الواقعة في نفس المستوى، فسيكون الشعاعان المستطاران (`1 و `2) في حالة تطابق طوري تام إذا كان الفرق في المسار يساوي عدد صحيح (n) من الأطوال الموجبة او أن

$$2d \sin \theta = n\lambda \qquad \text{....................(2-5)}$$

وأول من استنتج هذه العلاقة هو العلامة (W.L.Bragg) ولذا عُرفت فيما بعد بقانون براك (Bragg`s Law). ويحدد هذا القانون الشرط الأساس لحدوث الحيود. وتمثل n عدد صحيح يسمى مرتبة الحيود وهي تساوي عدد الأطوال الموجية الموجودة في الفرق بين مسارات الأشعة المستطارة بوساطة المستويات المتجاورة. أي أن:

$$n= 1,2,3,4,..............$$

لذلك تكون جميع الاشعة المستطارة من الذرات في كل المستويات في حالة توافق طوري تام ويقوي كل شعاع منها الآخر لتكوين الحزمة المحادة بالإتجاه المعين ،

وتكون الاشعة المستطارة في الاتجاهات الاخرى في حالة عدم توافق طوري ولذا يمحو كل شعاع منها الآخر.

**يمكن تمييز اكثر من نوع من أساليب الإستطارة:**

١- بواسطة الذرات المترتبة عشوائياً في المادة. فتحدث الاستطارة في كل الاتجاهات وتكون ضعيفة.

٢- بوساطة الذرات المترتبة بانتظام في المادة وتقسم الاستطارة هنا الى حالتين:

أ- فاستطارة الأشعة، في اتجاهات قليلة ومحدودة والتي تفي بقانون براك تسمى حيود اي يحدث تداخل تقوية.

ب- لاتوجد استطارة للأشعة في اغلب الاتجاهات، التي لاتفي بقانون براك لأن الحزم المستطارة سوف تلغي كل واحدة منها الاخرى.

## ٣-٥ قانون براك Bragg`s Law

هناك حقيقتان هندسيتان من المهم تذكرهما:

١- يكون الشعاع الساقط والعمود المقام على مستوى الإنعكاس والشعاع المحاد في مستوٍ واحد دائماً.

٢- تساوي الزاوية بين الشعاع المحاد والشعاع النافذ $2\theta$ دائماً، وتعرف هذه الزاوية بزوية الحيود وهذه الزاوية $(2\theta)$ هي التي تقاس تجريبياً. يمكن الاستنتاج من قانون براك ان الحيود لايحدث الا إذا كان الطول الموجي للأشعة في نفس مقدار مرتبة المسافة المعادة بين مراكز الاستطارة (الذرات) وكالآتي:

$$\frac{n\lambda}{2d} = \sin\theta < 1 \qquad \text{.....................(3-5)}$$

اذن يجب ان تكون $(n\lambda)$ اقل من $(2d)$. ان أصغر قيمة تأخذها $(n)$ هي $(1)$ عند الحيود. لذلك تكون $\lambda < 2d$ .

تكون قيمة المسافة (d) بين المستويات الذرية في اغلب البلورات بحدود $3\mathring{A}$ او أقل أي ان $\lambda$ لايمكن أن تزيد على $6\mathring{A}$. ولذلك لايمكن للبلورة ان تحيد الاشعة فوق البنفسجية ذات الطول الموجي $500\mathring{A}$ على سبيل المثال. ومن الجانب الآخر، إذا كانت $\lambda$ صغيرة جداً فزوايا الحيود ستكون صغيرة وتكون أكثر ملاءمة للقياس.

يمكن كتابة قانون براك كالآتي:

$$\lambda = 2\frac{d}{n}\sin\theta \qquad \text{...............(4-5)}$$

وبما أن n=1 أو 2 أو 3 .... وهي تمثل مرتبة الحيود او الحيود من المستوى المحدد بأدلة ملر hkl والذي يمثل مرتبة الحيود ايضاً ولذا يمكن كتابة قانون براك كالآتي:

$$\lambda = 2d_{hkl}\,\mathrm{Sin}\,\theta \qquad \text{..............(5-5)}$$

وتكون قيمة $d_{hkl}$ هنا حسب مقدار أدلة ملر لتلك المجموعة من المستويات.

## ٥-٤ اتجاهات الحيود Diffraction Directions

يمكن تعيين اتجاهات الحيود الممكنة اي قيم الزوايا $(2\theta)$ الممكنة بالرجوع الى الشكل (5-3) نلاحظ انه يمكن الحصول على عدة زوايا حيود هي $2\theta_1$ و$2\theta_2$ و $2\theta_3$ .... من المستويات (100) باستخدام شعاع ساقط بزوايا محددة هي $\theta_1$ و $\theta_2$ و $\theta_3$ ... لتكوين مراتب حيود اولى وثانية وثالثة وهكذا. إلا أن الحيود يمكن أن يحدث عند المستويات (110) و (111) و (213) و هكذا. ولذا يلزم استخدام علاقة عامة لهذا الغرض وكالآتي:

لنفرض ان البلورة المدروسة ذات بنية مكعبة فيكون:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{(h^2 + k^2 + l^2)}{a^2}$$

كما مر سابقاً، وبتعويض قيمة (d) في معادلة براك (5-5) ينتج آن:

$$\sin^2\theta = \frac{\lambda^2}{4a^2}(h^2+k^2+l^2) \qquad \text{............ (6-5)}$$

تتنبأ هذه المعادلة بكل زوايا براك الممكنة، التي يمكن حدوث الحيود عندها، من المستويات(hkl) لبلوره مكعبة ذات ضلع (حرف) طوله (a) . فعلى سبيل المثال، تصبح المعادلة الاخيرة (5-6) كالآتي :

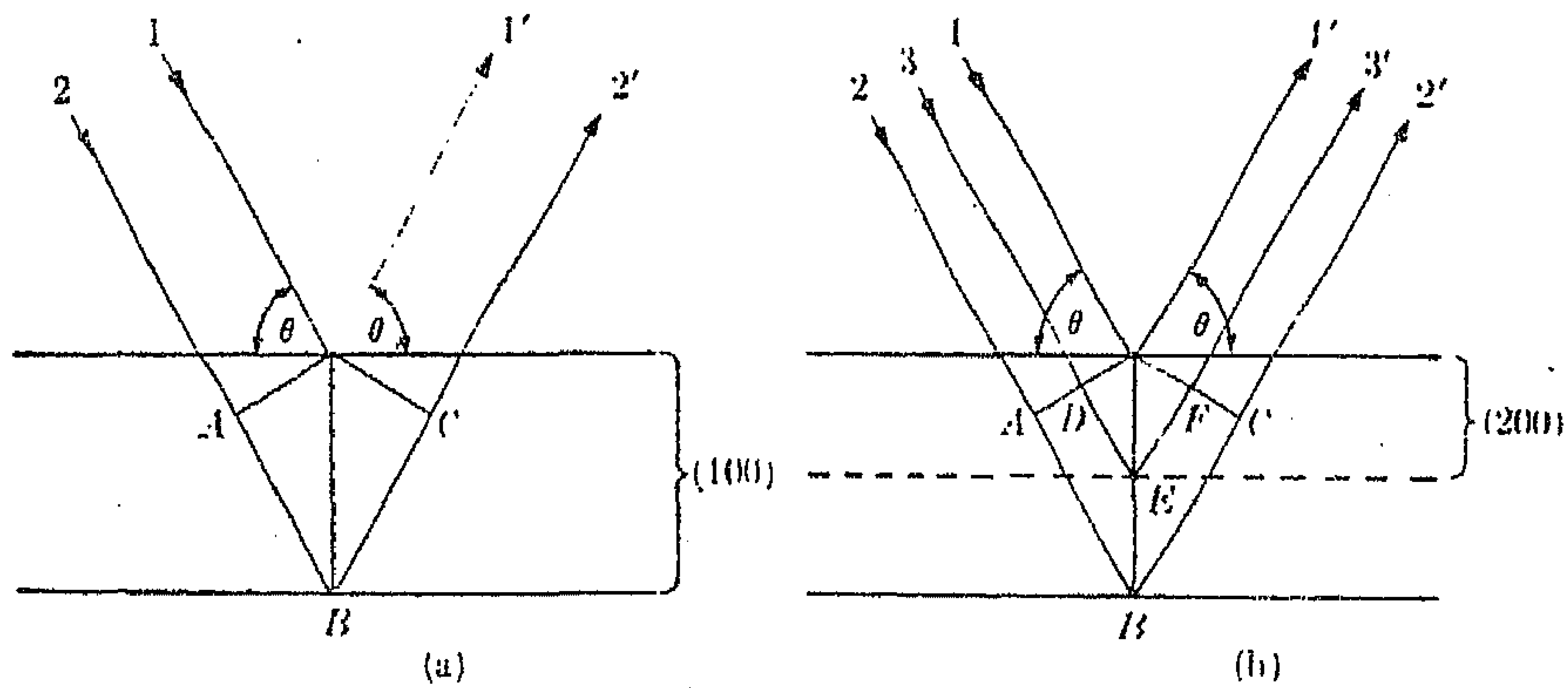
$$\sin^2\theta_{110} = \frac{\lambda^2}{4a^2} \qquad \text{...................... (7-5)}$$

أما عند كون البلورة رباعية (Tetragonal) لها الضلعين a و c فتكون معادلتها العامة :

$$\sin^2\theta = \frac{\lambda^2}{4}\left(\frac{h^2+k^2}{a^2}+\frac{l^2}{c^2}\right) \qquad \text{.......................(8-5)}$$

وهكذا بالنسبة لبقية الانظمة البلورية.

يتبين مما تقدم ان اتجاهات الحيود تتعلق بشكل وحجم الخلية الاساسية فقط وهذا يعني امكانية دراسة البلورة المجهولة بقياس اتجاهات الاشعة المحادة اي تعيين شكل وحجم الخلية الأساسية.




**الشكل (5-3) تكافؤ (a) الانعكاس 100 ذو المرتبة الثانية و (b) الانعكاس 200 ذو المرتبة الأولى.**

وكما سنرى لاحقاً فإن شدة الحزم المحادة تعين مواقع الذرات في الخلية الأساسية اي أنه يلزم قياس شدة الحزم إذا أريد الحصول على معلومات حول مواقع الذرات . كما تنخفض شدة الحزم المحاده في العديد من الأنظمة البلورية الى الصفر في بعض الاتجاهات اي أنه لاتوجد حُزم محادة كما تتنبأ به المعادلتان (5-7) و (5-8) . ولذا فإن هاتين المعادلتين وامثالهما تتنبأ بكل الحزم المحادة الممكنة .

## ٥-٥ طرائق الحيود Diffraction methods

يحدث الحيود كلما تحقق قانون براك ($2d \sin \theta = \lambda$) . حيث تضع هذه المعادلة شروطاً صارمة لكل من $\lambda$ و $\theta$ ولأية بلورة . ولذا وضعت طرائق محددة تم بموجبها تغيير إما $\lambda$ أو $\theta$ خلال التجربة ليمكن تحقيق قانون براك. فهناك ثلاث طرائق حيود رئيسية يمكن تحديدها مع ظروفها وهي:

| | الطول الموجي $\lambda$ | زاوية الحيود $\theta$ |
|---|---|---|
| ١- طريقة لاوا | متغير | ثابتة |
| ٢- طريقة تدوير البلورة | ثابت | متغيرة جزئياً |
| ٣- طريقة المسحوق | ثابت | متغيرة |

### ٥-٥-١ طريقة لاوا Laue method

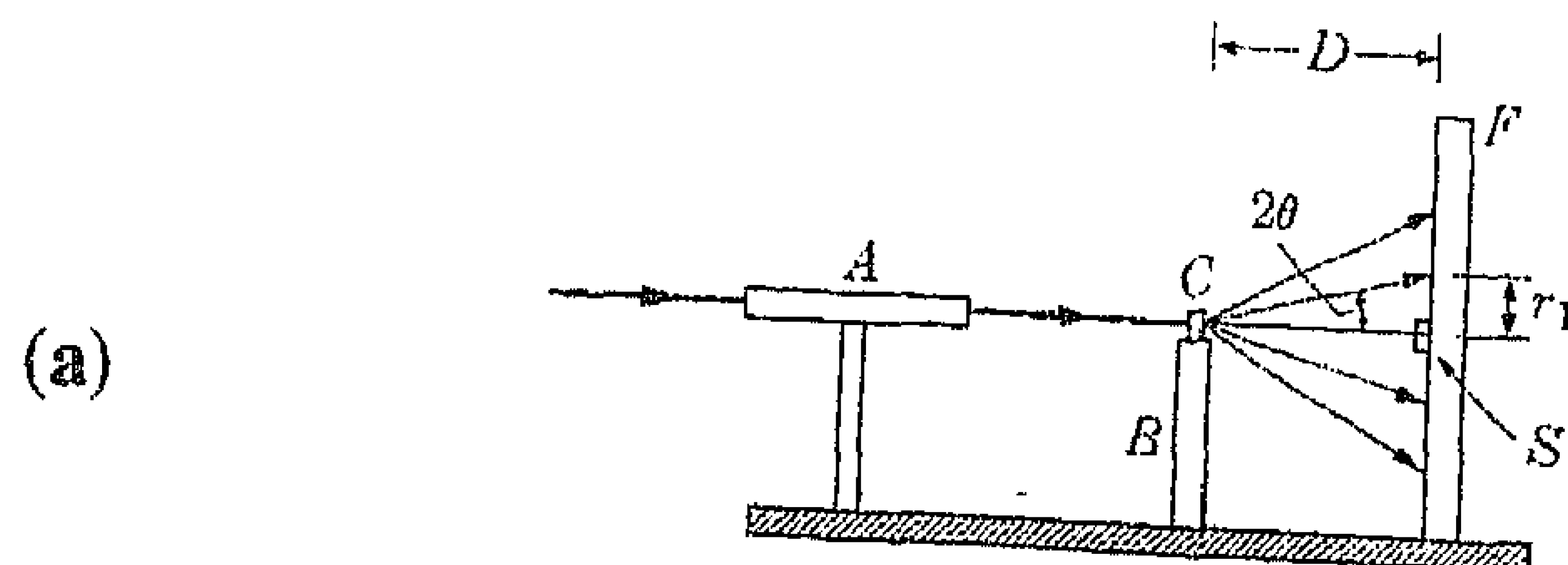
وتعتبر اول طريقة لدراسة الحيود وسميت باسم اول من قام بأجرائها وهو فون لاوا (Von Laue). تم في هذه الطريقة استخدام حزمة من الأشعة السينية المستمرة (البيضاء) الخارجة مباشرة من انبوبة الأشعة واسقطت على بلوره احادية. وحيث ان زاوية براك ($\theta$) ثابتة لكل مجموعة من مستويات البلورة ، فكل مجموعة منها تعمل على حيود طول موجي معين يلائمها بحيث تحقق قانون براك لقيم ($d$) و ($\theta$) المحددتين . وهذا يعني ان كل حزمة حيود لها قيمة مختلفة من الطول الموجي.

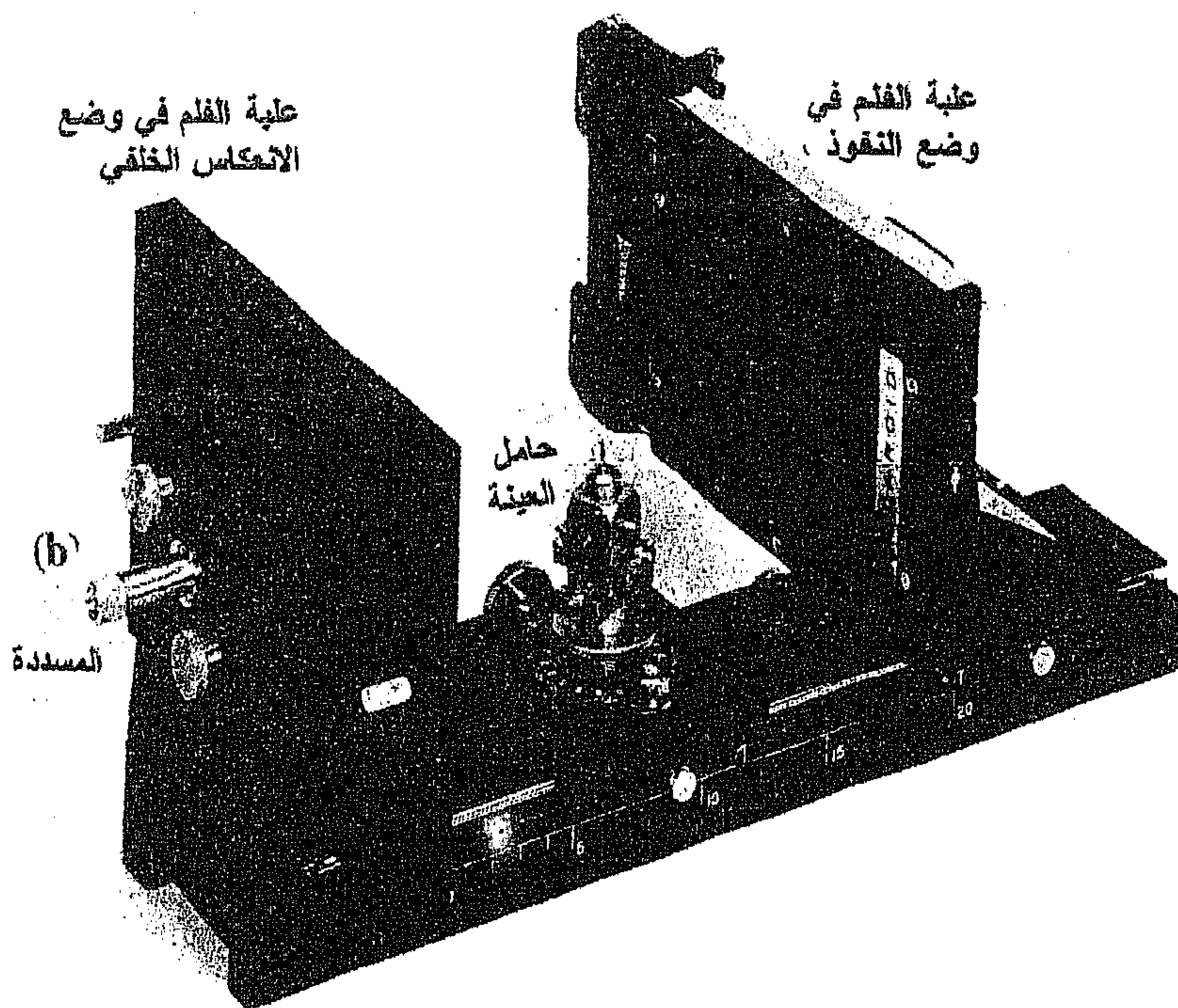
يوجد في هذه الطريقة حالتان اعتماداً على الأوضاع النسبية لمصدر الاشعة والبلوره والفلم هما:

## أ- طريقة الحيود بالنفوذ Transmission method

وفيها يكون موضع العينة، التي تكون بهيئة بلورة منفردة (Single crystal) بين الفلم ومصدر الاشعة يوضح الشكل (5-4) التقنية المستخدمة في هذه الطريقة.

(a)




**الشكل (5-4) (a) تخطيط كاميرا لاوا للنفوذ و (b) صورة كاميرا لاوا لطريقة النفوذ وطريقة الانعكاس الخلفي في نفس الوقت وقد وضع النموذج بين حافظتي الفلمين.**

أما زاوية براك θ فيمكن حسابها لكل نقطة (حزمة) حيود كالآتي:

$$\tan 2\theta = \frac{r_1}{D} \qquad \text{.....................(9-5)}$$

حيث تمثل :

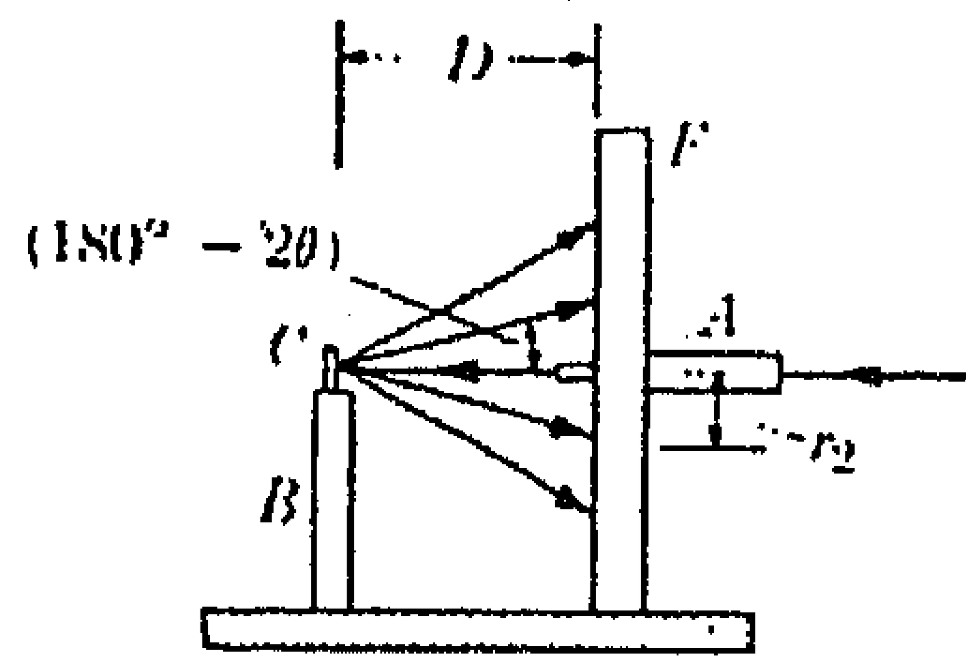
$r_1$ المسافة من نقطة الحيود الى مركز الفلم (نقطة سقوط الشعاع النافذ الأساس) و D المسافة بين النموذج والفلم (وعادة ما تكون 5 cm) . وفي هذه التقنية تكون العينة رقيقة نسبياً.

**ب- طريقة الحيود بالإنعكاس الخلفي Back Reflection method**

وفيها يكون موضع الفلم بين مصدر الاشعة والبلورة (العينة). يبين الشكل (5-5) تقنية هذه الطريقة. أما زاوية براك (θ) لكل نقطة حيود فيمكن حسابها كالآتي:

$$\tan (180 - 2\theta) = \frac{r_2}{D} \qquad \text{................ (10-5)}$$

حيث تمثل $r_2$ المسافة بين نقطة الحيود ومركز الفلم (نقطة مرور الشعاع الساقط). تكون العينة على هيئة بلورة منفردة أيضاً ولايشترط ان تكون رقيقه.



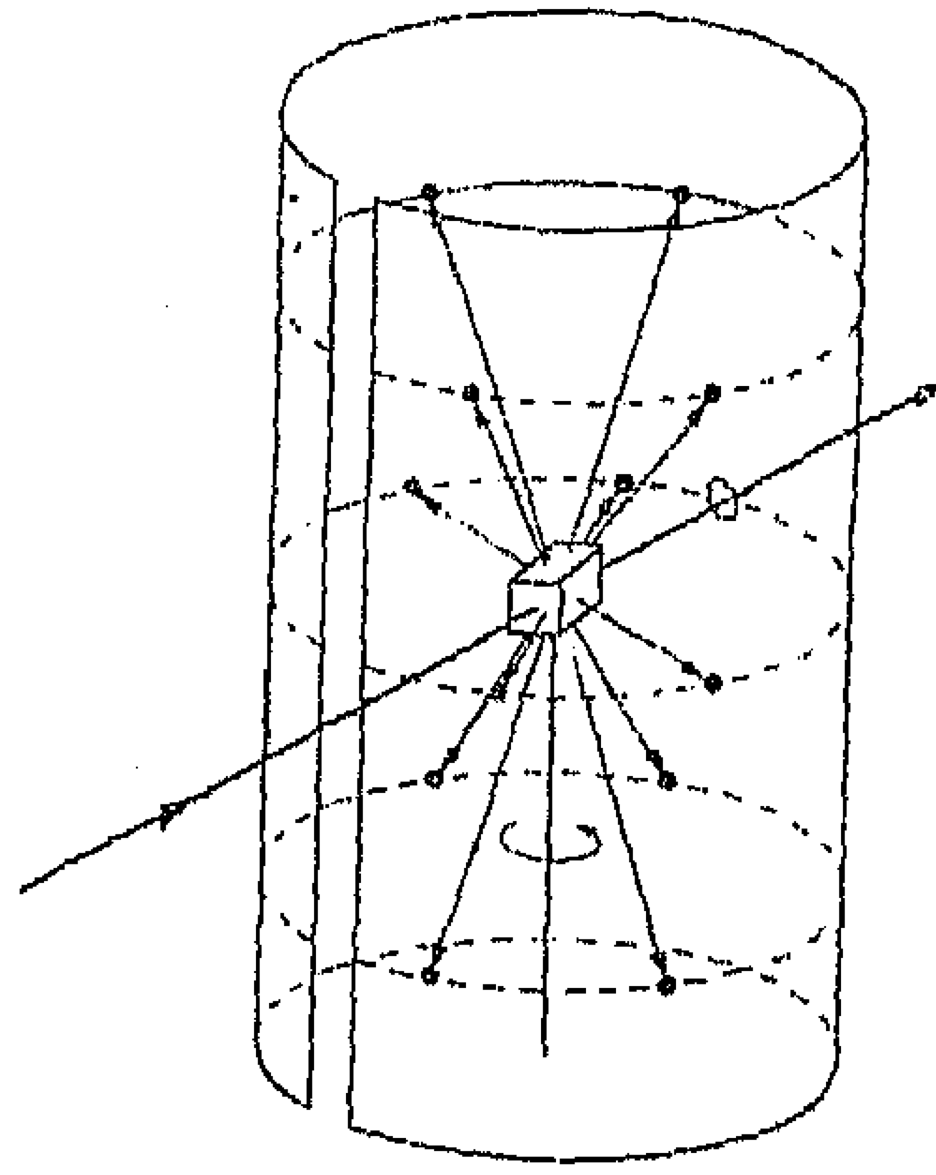

**الشكل 5-5 رسم تخطيطي لكاميرا الاوا بتقنية الانعكاس الخلفي.**

يكون الفلم في كلتا الحالتين (أ و ب) على شكل لوح مستوٍ عمودياً على اتجاه الشعاع الساقط .

تستخدم طريقة لاوا بتقنيتيها (أ و ب) أساساً لتعيين توجه (orientation) البلوره المنفردة وتخمين نوعيتها على سبيل المثال ، مدى تشويهها وعيوبها:

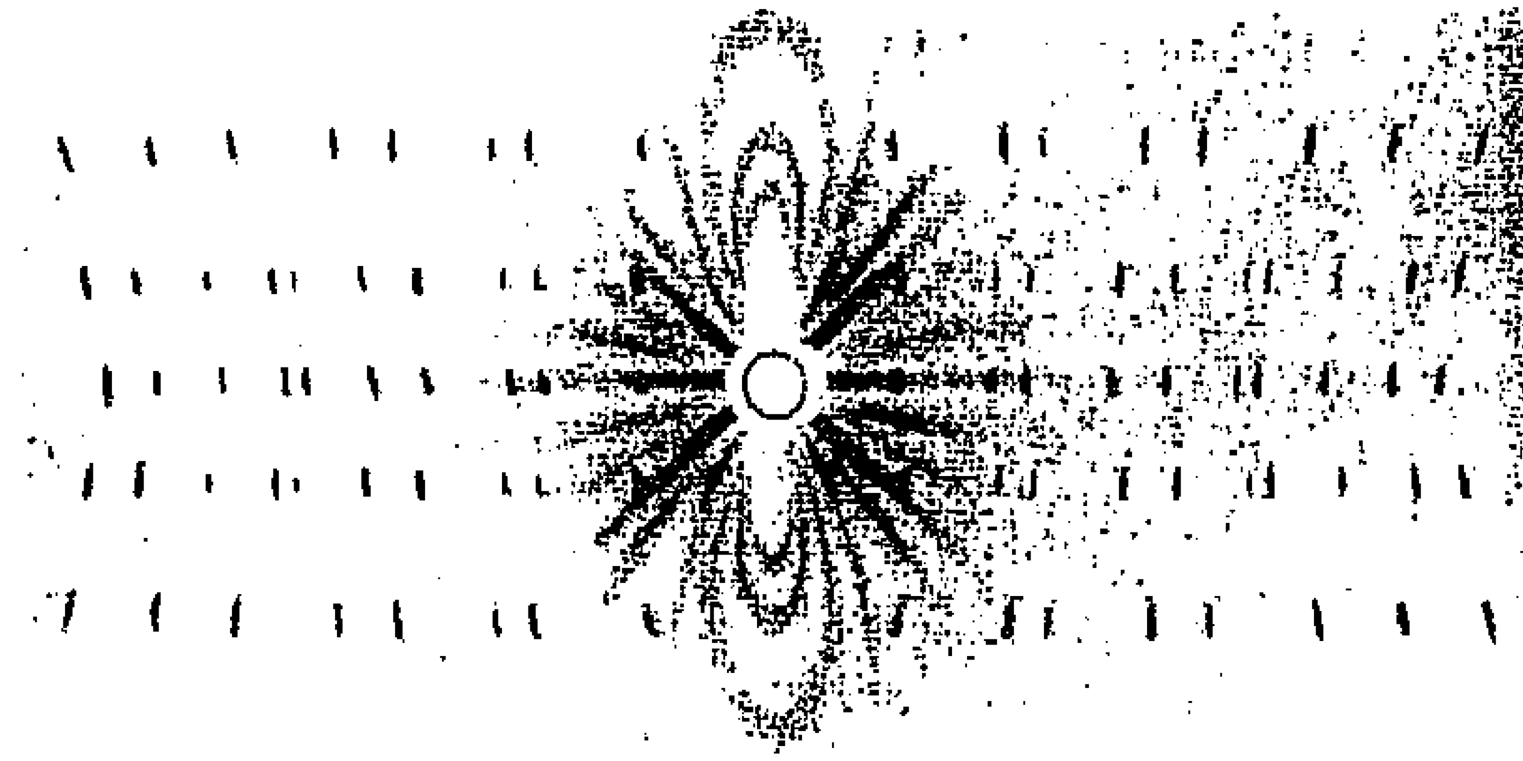
### ٢-٥-٥ طريقة تدوير البلورة Rotating crystal method

تستخدم في هذه الطريقة بلوره منفردة ويتم تثبيتها باتجاه أحد محاورها او اي اتجاه بلوري مهم بحيث يكون عمودياً على اتجاه الأشعة السينية الاحادية الطول الموجي (monochromatic) الساقطة . يوضع فلم اسطواني حول البلورة ثم تدور البلورة حول الاتجاه المختار بحيث يكون محور الفلم الاسطواني متطابقاً مع محور تدوير البلورة كما مبين في الشكل (6-5) . فعندما تدور البلورة ستحقق بعض من مجاميع مستويات الشبيكة البلوريه، آنياً، قانون براك لذلك الشعاع الاحادي الموجه المستخدم وعند هذه اللحظة تتكون حزمة محادة.



**الشكل 5-6 طريقة تدوير البلورة.**

تشكل الحزم المحادة (المنعكسة) مخاريط وهمية بحيث تنطبق محاورها مع محور التدوير. يكون شكل نمط الحيود كما مبين في الشكل (5-7) ، وبما ان تدوير البلورة يتم حول محور واحد في هذه الطريقة لذلك لايمكن ان تأخذ زاوية براك (θ) كل القيم الممكنة من صفر الى التسعين لكل مجموعة من المستويات.



الشكل 5-7 نمط الحيود بطريقة تدوير البلورة ولبلورة الكوارتز (quartz) (سداسية) مدارها حول المحور (C) . وباستخدام Cu kα.

تستخدم هذه الطريقة أساساً لتعيين البنى البلورية اذا لم تكن معروفة.

### ٣-٥-٥ طريقة المسحوق Powder method

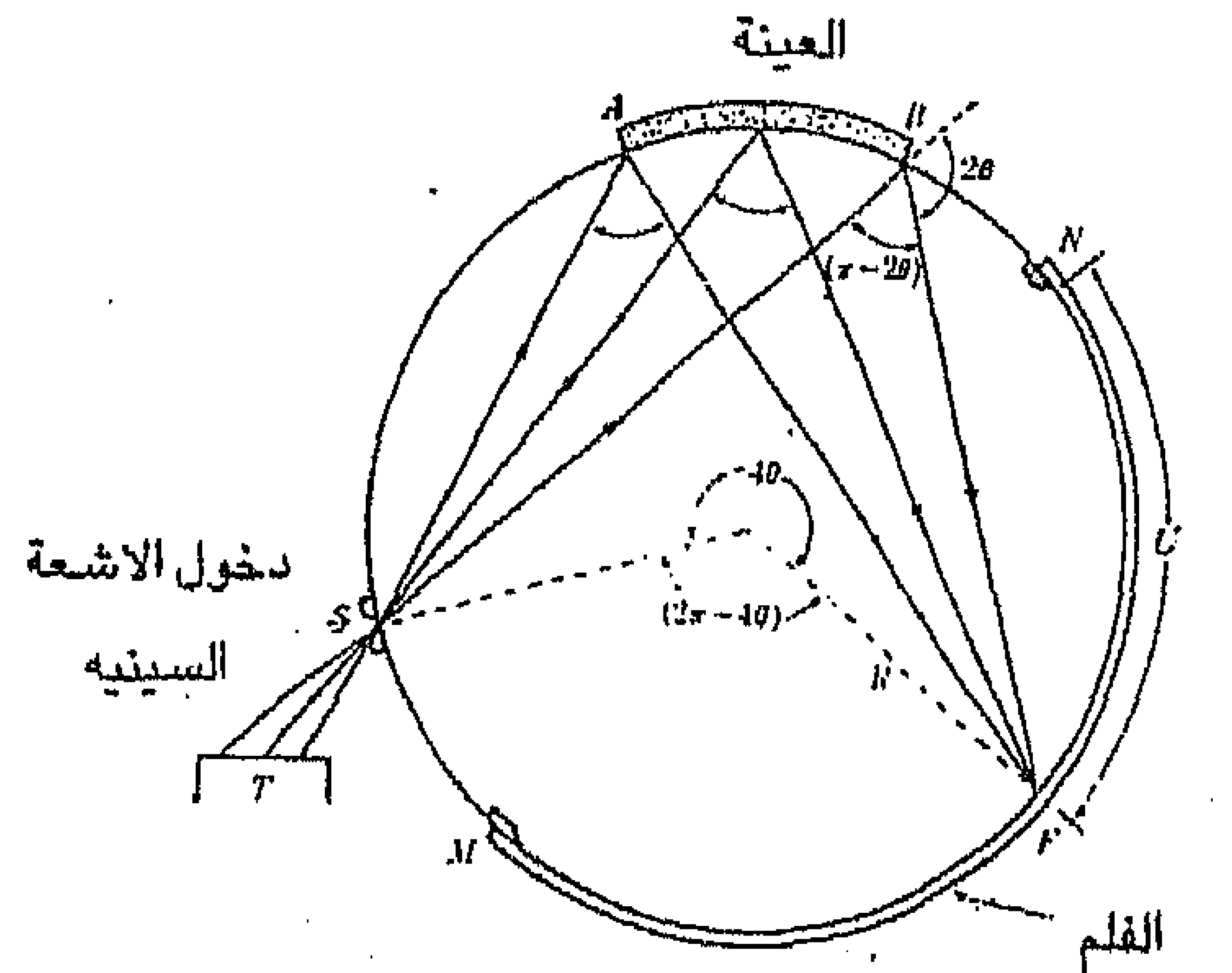
تطحن البلورة المراد فحصها حتى تتحول الى مسحوق ناعم جداً او تكون العينة المفحوصة متعددة البلورات (polycrystalline) لأنها تكافئ المسحوق عملياً لهذا الغرض، ويتم وضعها في مسار الأشعة السينية الاحادية الموجه. فكل جسيم او

دقيقة في المسحوق يمثل بلوره او عدة بلورات صغيرة متجهة بشكل عشوائي نسبة الى اتجاه الشعاع الساقط. ولابد ان يكون قسم منها، وبالصدفة، متجهاً اتجاهاً مضبوطاً، وذلك لكثرة عددها ، بحيث ان المستويات (100) ، على سبيل المثال، يمكن ان تعكس الشعاع الساقط. كما أن بقية البلورات ستكون متجهة بصورة مضبوطة للإنعكاس (110) وهكذا بالنسبة لبقية المستويات فتكون النتيجة ان كل مجموعة من مستويات الشبيكة البلورية قابلة على الانعكاس. ولذا تكافئ كتلة المسحوق بالحقيقة بلورة منفردة تدور حول كل المحاور الممكنة وليس حول محور واحد.

ستكون الحزم المحادة هنا بهيئة مخاريط متعددة حيث يتكون مخروط منفصل لكل مجموعة من مستويات الشبيكة البلورية تختلف بالمسافة البينه (d) .

هناك ثلاث طرائق رئيسية من طرائق حيود المسحوق اعتماداً على الموقع النسبي للعينة والفلم وشكلهما وهي:

١- طريقة الكاميرا المبئرة Focusing Camera : وفيها يوضع الفلم والنموذج ومصدر الاشعة جميعها على سطح اسطوانه. يبين الشكل (5-8) احد أنواع هذه الكاميرات حيث يظهر في الشكل انعكاس واحد (hkl) كما يظهر موقع النموذج (AB) ومصدر الاشعة (S) والفلم MN .




**الشكل (5-8) الكاميرا المبئرة وقد ظهر انعكاس hkl واحد فقط.**

يمكن استخراج زاوية براك ($\theta$) من المسافة (U) المقاسة على الفلم اي من خط الحيود الى بداية الفلم عند النقطة (N) تقريباً ومن ثم استخدام العلاقة التالية:

$$4\,\theta R = U + \text{القوس}\ SABN \quad ................(11\text{-}5)$$

أما من الناحية التجريبية فتستخرج $\theta$ بضبط الكاميرا بوساطة مادة ذات ثابت شبيكي (a) معلوم مثل NaCl بدلاً من تطبيق المعادلة (5-11) .

يمكن استخراج قدرة التمييز (resolving Power) لهذه الكاميرا بأخذ تفاضل المعادلة (5-11) حيث تكون:

$$d\theta = \frac{dU}{4R} \quad ...............(12\text{-}5)$$

وإذا فاضلنا معادلة براك ($\lambda = 2d\ Sin\theta$) نحصل على الآتي:

$$\frac{d\theta}{dd} = -\frac{1}{d}\tan\theta \quad ..............(13\text{-}5)$$

ومن اتحاد المعادلتين (5-12) و (5-13) ينتج أن :

$$\frac{dU}{dd} = -\frac{4R}{d}\tan\theta$$

اذن :

$$(R.P)\text{قدرة التمييز} = \frac{d}{\Delta d} = -\frac{4R}{\Delta U}\tan\theta \ ........... (14\text{-}5)$$

وبهذه المعادلة (5-14) يمكن مقارنة قدرة التمييز (هي قابلية الجهاز لفصل خطوط الحيود من المستويات الذرية المتقاربة البعد البيني ) لطرائق المسحوق الثلاث.

٢- طريقة ثقب الدبوس Pinhole method : يكون الفلم في هذه الحالة بهيئة لوح مستو موضوع عمودياً على حزمة الأشعة السينية الساقطة ويبعد عن النموذج بمسافة ملائمة. تشبة هذه التقنية تلك التي في طريقة لاوا وفيها حالتين ايضاً هما تقنيتا الحيود بالنفوذ و الحيود بالإنعكاس الخلفي إلا أن الفرق الوحيد هنا هو ان النموذج إما أن يكون على هيئة مسحوق حقيقي او يكون على هيئة قطعة متعددة البلورات ، والتي تكافئ المسحوق الحقيقي من الناحية العملية لهذه الفحوصات، كما

أسلفنا، لأن كل جسيم (أو دقيقة) من المسحوق يكافئ بلورة أو عدة بلورات من المادة المتعددة البلورات.

لهذه الطريقة ميزة على طرائق المسحوق الأخرى في ظهور حلقة حيود كاملة و ليس جزء منها كما في الطريقتين الآخريين. يبين الشكل (5-9) نمط حيود نافذ (Transmission diffraction Pattern) لصفيحة من الألمنيوم. لكنه من الناحية الأخرى تكون قيم زاوية الحيود (θ) التي يمكن تسجيلها محدوده، فإما أن يتم الحصول على انعكاسات ذات زوايا منخفضة القيم او مرتفعة القيم لكنه لايمكن الحصول على مدى قيم الزوايا المتوسطة، لاحظ الشكل (5-10).

يمكن ايجاد (θ) بطريقة النفوذ من العلاقة التالية:

$$\tan 2\theta = \frac{U}{2D} \qquad \text{.............} \ (15\text{-}5)$$

حيث تمثل U قطر حلقة الحيود (حلقة دبي)

و D المسافة بين النموذج والفلم

أما حساب (θ) بطريقة الانعكاس الخلفي فتكون من العلاقة الآتية:

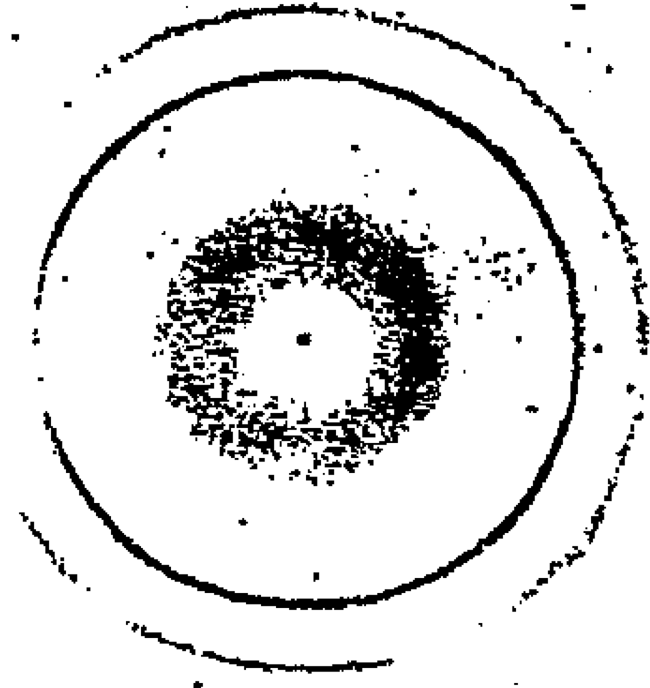
$$\tan(\pi - 2\theta) = \frac{V}{2D} \qquad \text{.............} (16\text{-}5)$$

حيث تمثل V قطر حلقة الحيود (حلقة دبي).

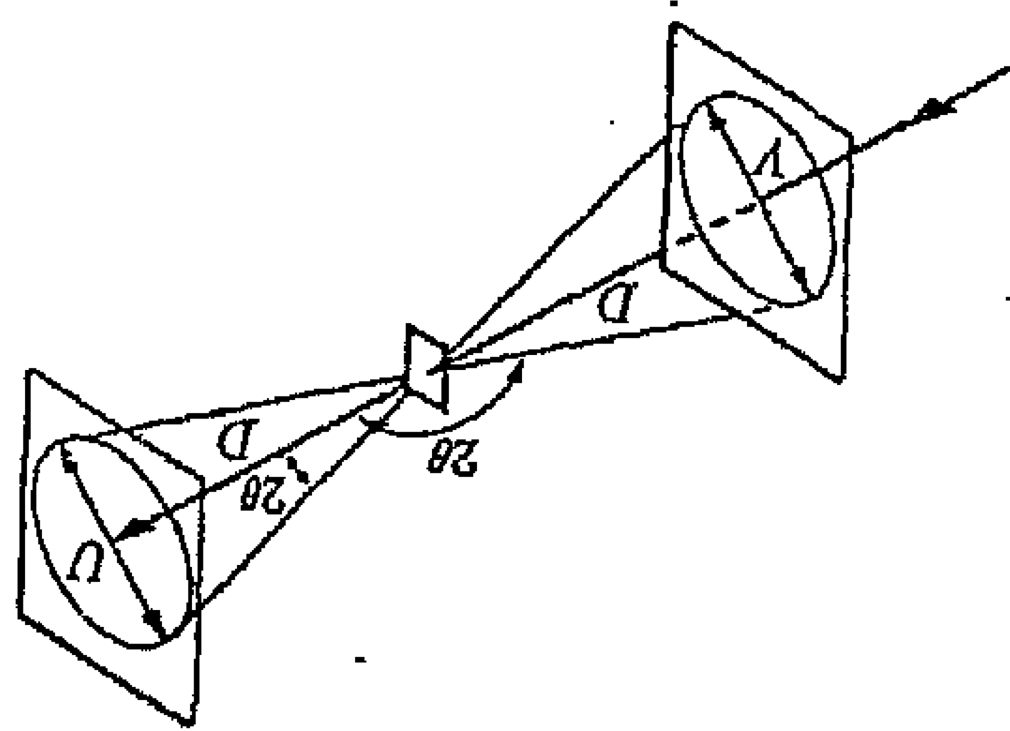
يكون مقدار المسافة D عادة بين 3 الى 5 cm .

٣- طريقة دبي - شيرر Debye - Scherrer : وفي هذه الطريقة يوضع الفلم على سطح اسطوانه (الكاميرا) لاحظ الشكل (5-11) ، والنموذج في محور الاسطوانة ويكون اما على هيئة سلك متعدد البلورات او مسحوق موضوع في انبوبه زجاجية او من اللدائن (البلاستيك) رقيقة الجدران وذات قطر صغير (بحدود 1mm أو أقل).

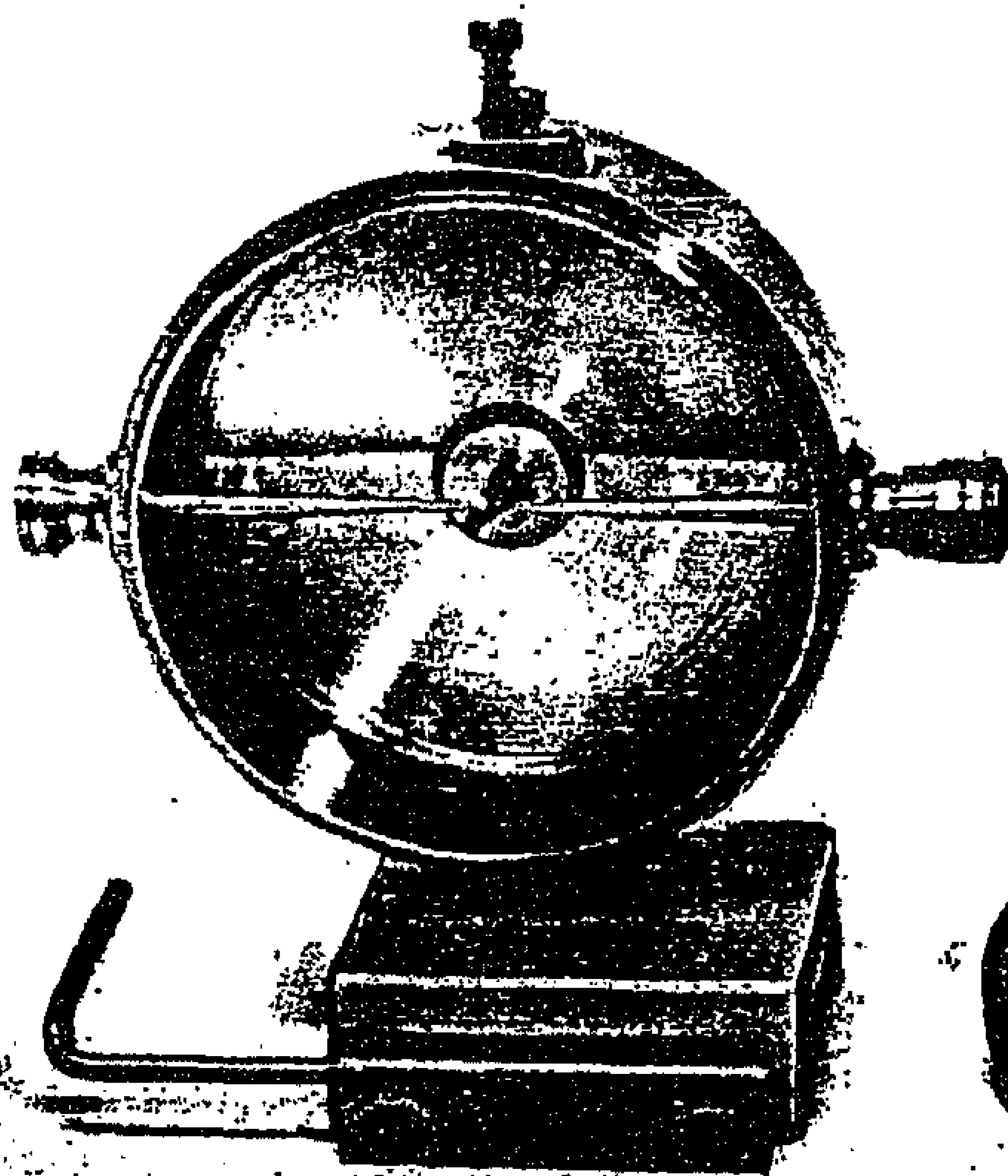
تكون الحزم المحادة في كل هذه الطرائق، وكما ذكر سابقاً، على شكل مخاريط محورها مطابق للشعاع الساقط او امتداده.

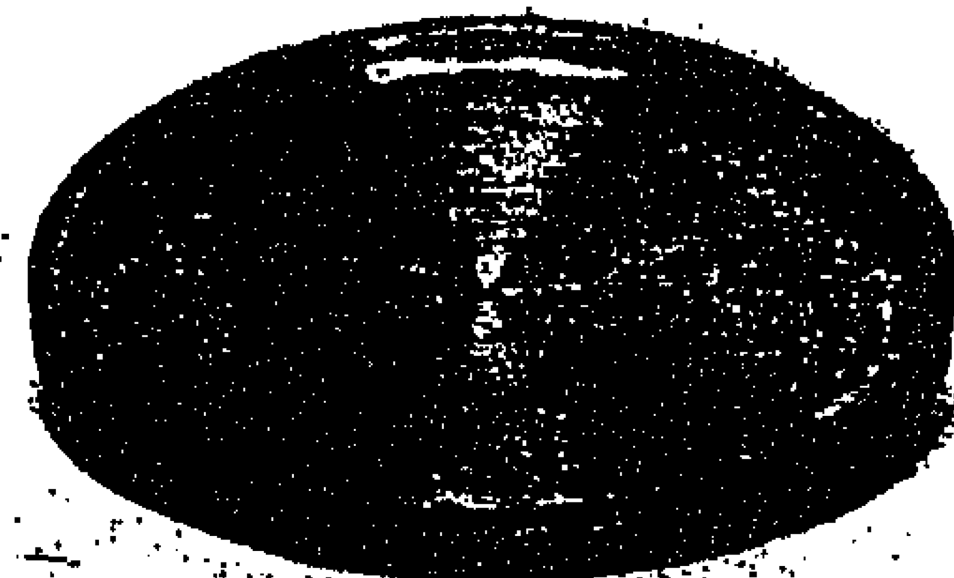


شكل(5-9) صوره لنمط حيود نافذ لصفيحة من الألمنيوم استخدمت الاشعة Cukα ان عدم التجانس في عتمة حلقتي الحيــود ناتج عن وجود توجــه تفضيلـــي (Preferred orientation) في النموذج.



الشكل (5-10) العلاقات الزاوية في طريقة ثقب الدبوس.



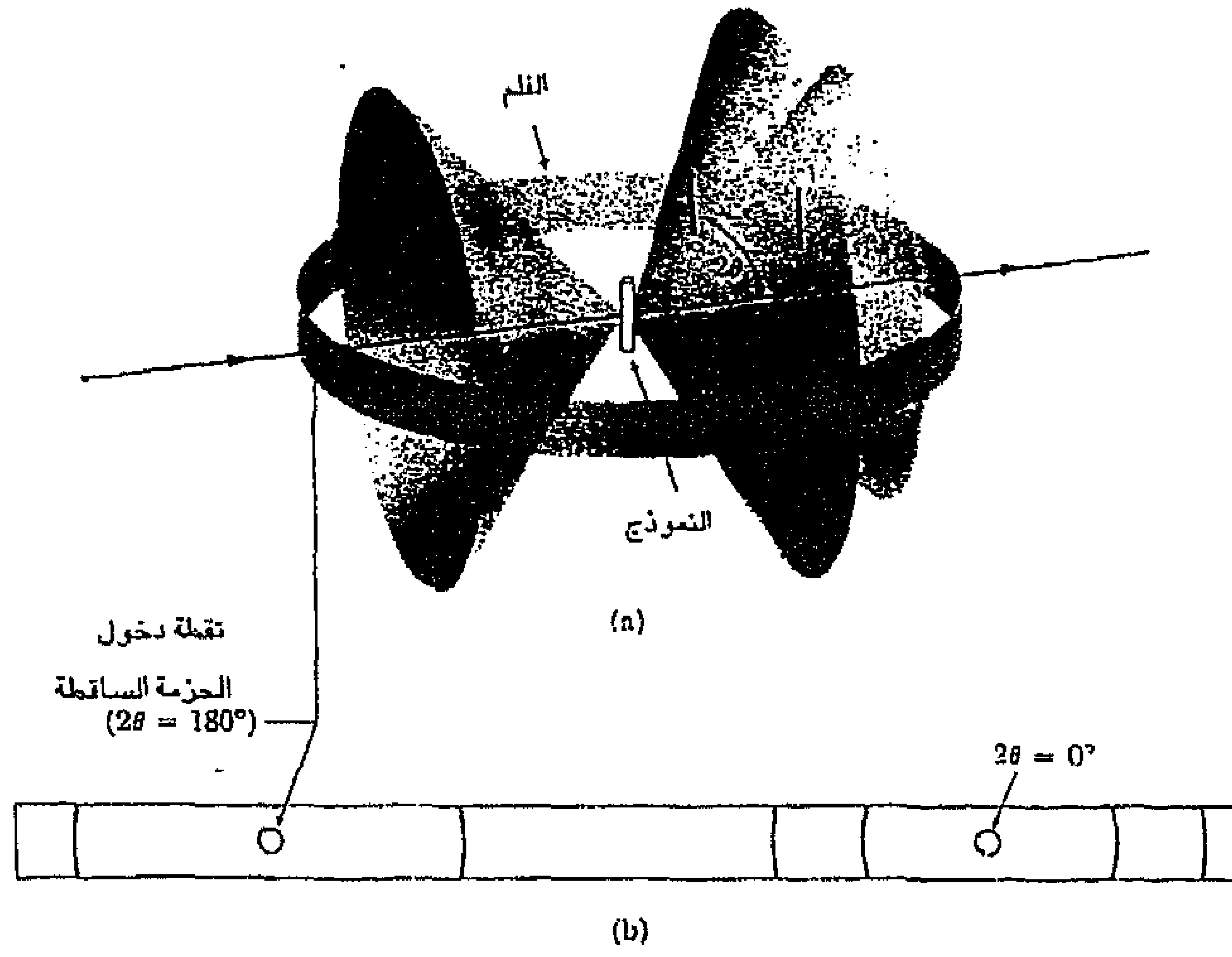


الشكل (5-11)
كاميرا دبي – شيرر
مع كشف الغطاء
رؤية ما في داخل
الكاميرا.

سيتم التركيز على طريقة دبي شيرر لشيوعها في مختبرات حيود الاشعة السينية التعليمية.

يبين الشكل (5-12) ثلاثة من هذه المخاريط . كما يوضح تقنية دبي– شيرر التي يتم فيها استخدام فلم على شكل شريط موضوع حول اسطوانة قصيرة ويكون النموذج في محورها والحزمة الساقطة موجهة عمودياً على هذا المحور. يكون تقاطع مخاريط الحيود مع شريط الفلم الاسطواني بشكل خطوط وعندما يتم فتح الفلم ليكون بصورة مستوية يظهر نمط الحيود، بصورة تخطيطية، كما في الجزء الأسفل (b) من الشكل (5-12) يبين الشكل (5-13) صوراً لثلاثة انماط من الحيود لمساحيق معادن مختلفة البنية البلورية وهي النحاس (Cu) مكعب متمركز الوجه (FCC) والتنكستن (W) مكعب متمركز الجسم (BCC) والخارصين (Zn) سداسي متراص (HCP) .يتكون كل خط حيود من عدد كبير من بقع (نقط) صغيرة كل واحدة تمثل دقيقة (جسيم) بلورية منفصلة. تتموضع هذه البقع قريبة جداً من بعضها بحيث تظهر كأنها خط متصل. تكون خطوط الحيود منحنية بصورة عامة مالم تكون زاوية حيودها مساوية الى تسعين درجة ($2\theta = 90^\circ$) حيث ستكون مستقيمة. يمكن تعيين ($\theta$) من قياس موضع خط الحيود على الفلم ومن معرفتنا للطول الموجي ($\lambda$) يمكن حساب المسافة البينيه (d) لسطوح الانعكاس للمادة البلورية التي تكوّن ذلك الخط.

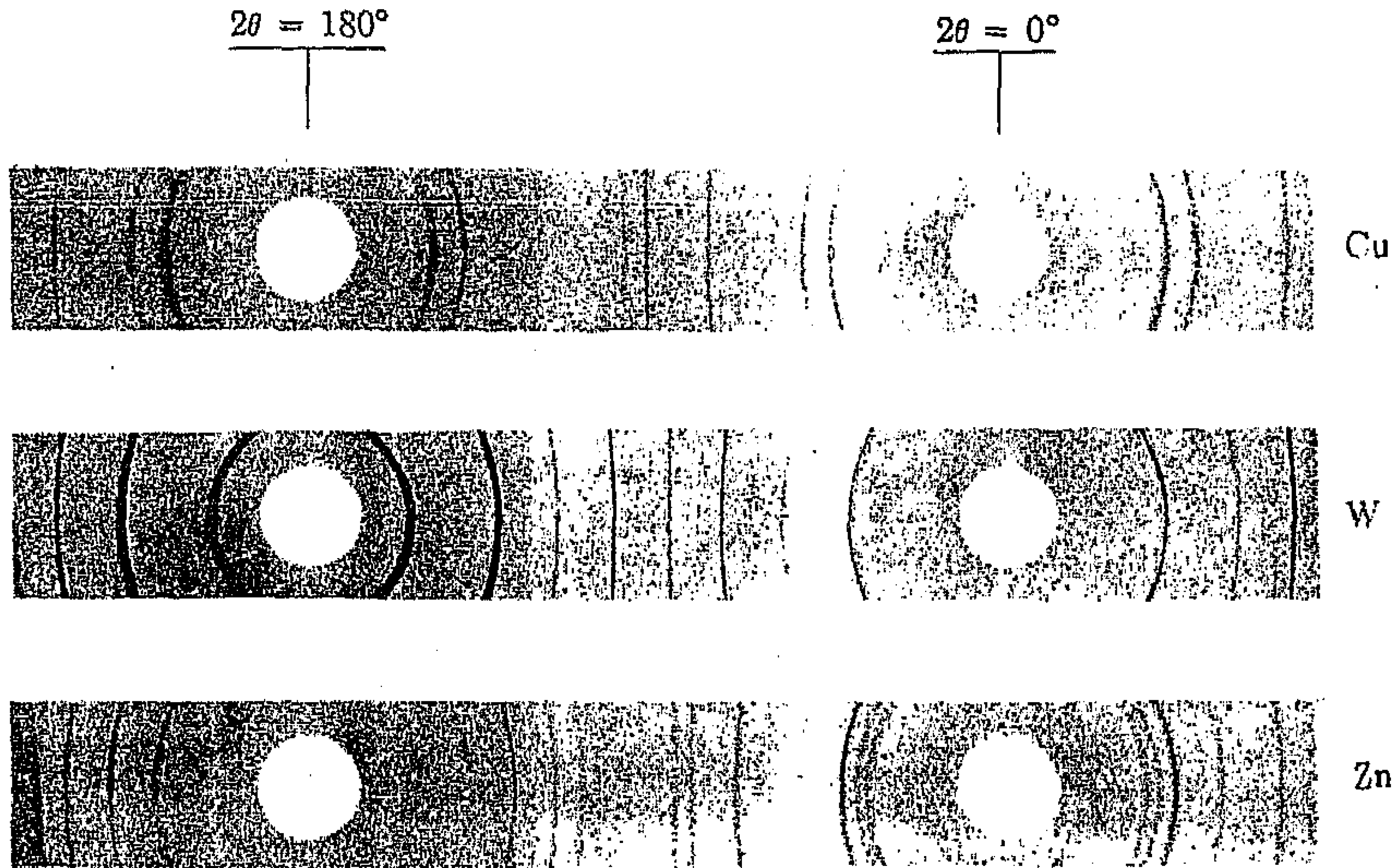
يمكن وبصورة عكسية، التنبأ بمواضع كل خطوط الحيود الممكنة على الفلم اذا عُلم حجم ونوع الخلية الاساسية للمادة البلورية. فيتولد الخط ذو قيمة $2\theta$ الاوطء بالإنعكاس من المستويات ذات المسافة البينيه الاكبر فلو أخذ نظام المكعب، على سبيل المثال، تكون (d) اكبر مايمكن عندما تكون ($h^2 + k^2 + l^2$) أصغر ما يمكن، وأقل قيمة لهذا الحد هو واحد، حيث تعود هذه القيمة للمستوى (100). ولذا يكون الانعكاس 100 له قيمة $2\theta$ اقل من اي قيمة أخرى. أما الانعكاس الممكن الآخر الذي يلي هذا الانعكاس من حيث قيم $2\theta$ فهو (110) وهو الانعكاس الذي يكون معامله ($h^2 + k^2 + l^2$) مساوياً لأثنين وهكذا.




الشكل (5-12) طريقة المسحوق لدبي – شيرر:

(a) علاقة الفلم بالنموذج والحزمة الساقطة

(b) مظهر تخطيطي بعد فتح الفلم على سطح مستوي.




الشكل (5-13) أنماط حيود بتقنية دبي – شيرر لمساحيق من النحاس (Cu) (FCC) والتنكستن (W) (BCC) والخارصين (Zn) (HCP) باستخدام $CuK\alpha$ بكاميرا ذات قطر مقداره 5.73 cm .

تستخدم طريقة دبي – شيرر بشكل واسع خصوصاً في حقل هندسة المعادن . وتعتبر طريقة المسحوق هي الطريقة الوحيدة الممكن استخدامها عندما لاتتوفر لدينا نماذج من بلورات منفردة (Single crystals) وهي الحالة الاعم والأغلب في حقل هندسة المعادن واغلب المواد. تعتبر هذه الطريقة الأكثر ملاءمة لتعيين ثوابت الشبكة البلورية (Crystal Lattice Parameters) بدقة عالية وكذلك لتعيين الأطوار سواء كانت المادة ذات طور واحد فقط او خليط من أطوار متعدده كما في السبائك المتعددة الاطوار (Polyphase alloys) ونواتج التأكل (Corrosion Products) والمواد المقاومة للحرارة (Refractories) والصخور (Rocks)، كما ان لهذه الطريقة استخدامات أخرى أيضاً في الحقول العلمية والصناعية الاخرى.

**طرائق تحميل كاميرا دبي – شيرر بالفلم:**

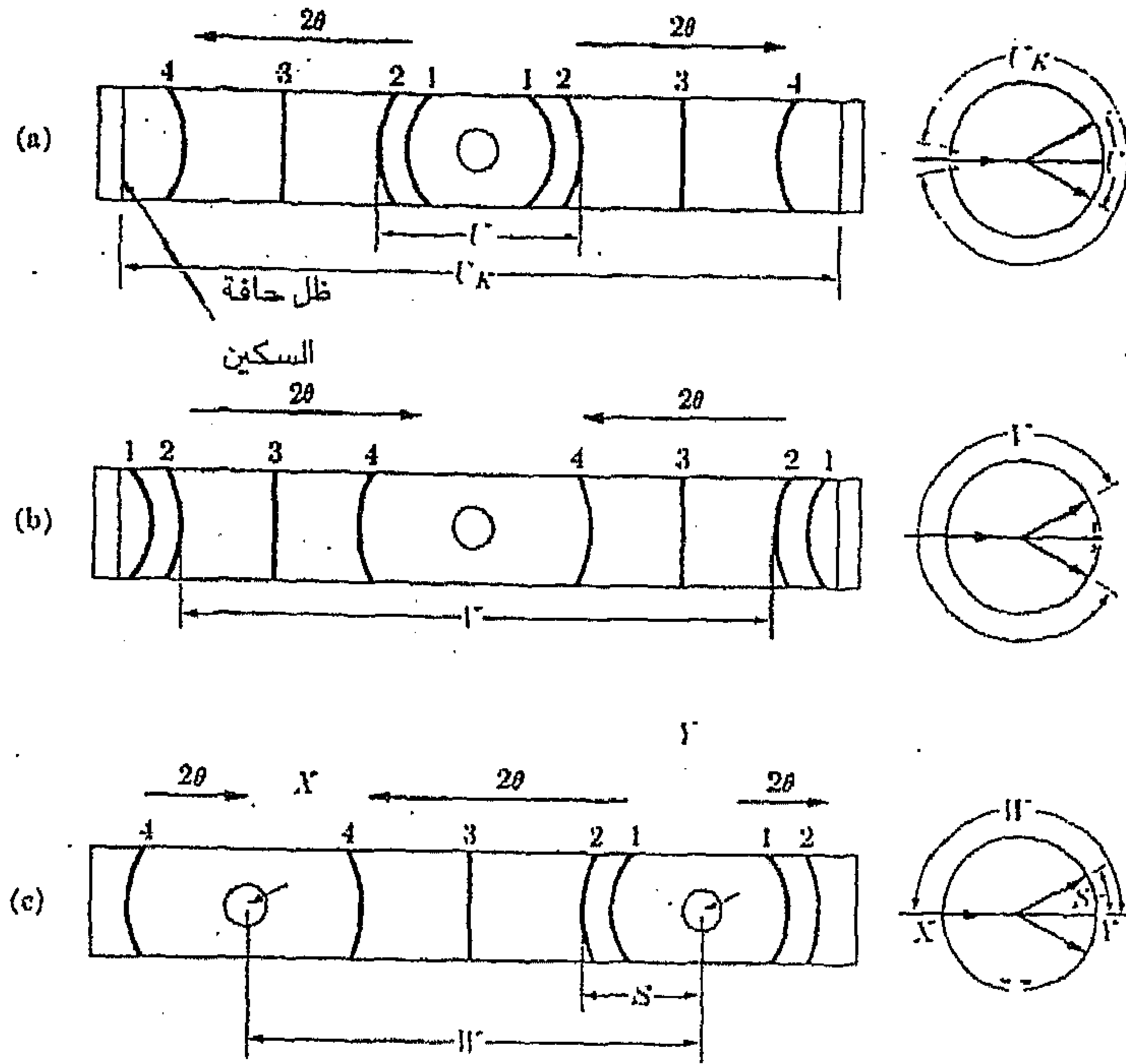
توجد ثلاث حالات تحميل يمكن تمييزها حسب مكان دخول الاشعة السينية وخروجها بالنسبة لنهايتي شريط الفلم.

يثقب شريط الفلم ذو الطول المحدد، حسب قطر الكاميرا، إما ثقباً واحداً او ثقبين وحسب الحالة المستخدمة في الكاميرا. يوضح الشكل (5-14) طرائق ترتيب شريط الفلم الثلاث. تبين الاشكال على جهة اليمين علاقة وضع الفلم مع اتجاه الشعاع الساقط بينما تمثل الاشكال على جهة اليسار اشرطة الفلم مفتوحة بصوره مستويه.

يكون الثقب في الحالة (a) في مركز الفلم تماماًو فيها تدخل حزمة الاشعة من الفرجة الموجودة بين نهايتي الفلم ويكون خروج الحزمة النافذة من الثقب الموجود في مركز الفلم. يتولد من ذلك نمط حيود متناظر حول المركز. يتم الحصول على زاوية الحيود (θ) للإنعكاس المحدد بقياس (U) وهو يمثل المسافة الفاصلة بين خطي حيود متكونان من نفس مخروط الاشعة الحادة وكالآتي:

$$4 \theta R = U \qquad \text{.........................} \ (17\text{-}5)$$

حيث تمثل R نصف قطر الكاميرا.




**الشكل (14-5) طرائق تحميل الفلم الثلاث في كاميرات دبي.**

**خطوط الحيود المتوافقة لها نفس الارقام في كل الأفلام.**

الواقع ان فلم التصوير الضوئي وغيره ينكمش (يقصر) قليلاً أثناء عملية التحميض والتجفيف ، وهذا الانكماش بالنتيجة يؤثر على قياس المسافة (U) وفي النهاية على θ . لذا لزم تصحيح الخطأ الناتج عن الانكماش وذلك بملاحظة حافتي السكين التي يتم تثبيتها عند نهايتي الفلم في الكاميرا لأنهما سيتركان أثراً حاداً واضحاً بعد اجراء الفحص وتحميض الفلم. تنكمش المسافة القياسية بين الاثرين بنفس النسبة التي تنكمش بها المسافة بين اي زوج من خطوط الحيود العائدة لنفس

المخروط. لذا يمكن اجراء تصحيح للخطأ الحاصل من جراء الانكماش لأن المسافة الزاوية الفاصلة بين حافتي السكين في الكاميرا معلومة ($4\theta_k$) اما بالقياس المباشر او باستخدام مادة بلورية معلومة الثابت البلوري، وعليه يمكن الحصول على قيمة ($\theta$) المضبوطة للإنعكاس المحدد من العلاقة التالية:

$$\frac{\theta}{\theta_k} = \frac{U}{U_k} \qquad \text{........................ (18-5)}$$

$U_k$ هي المسافة بين أثري حافة السكين على الفلم.

يوضح الشكل (b) حالة وضع الفلم التي تعاكس الوضع الأول (a). تمر الحزمة الساقطة من الثقب الموجود في الفلم وعليه تكون العلاقة .

$$(2\pi - 4\theta)\, R = V \qquad \text{........... (19-5)}$$

يمكن استخدام أثر حافتي السكين أيضاً في تصحيح انكماش الفلم.

توضح الحالة (c) من الشكل (5-14) عدم التناظر الموجود في نمط الحيود . يوجد في هذه الحالة ثقبين في الفلم حيث يمر الشعاع الساقط من أحدهما ويخرج الشعاع النافذ من الثاني. وبما أن من الممكن تعيين القياسات على الفلم عند مكان مرور الشعاع الساقط ومكان خروج الشعاع النافذ لذلك لاتوجد ضرورة لاستخدام حافتي السكين لتصحيح انكماش الفلم. تكون الزاوية $2\theta = 180$ عند النقطة (X) وهي مركز مرور الشعاع (الحزمة) الساقط (منتصف المسافة بين الخطين 4 و 4 ) وبالتشابه تعتبر الزاوية $2\theta = O^{\circ}$ عند نقطة Y حيث مكان خروج الشعاع النافذ من الكاميرا وتقع عند منتصف المسافة بين الخطين 1 و 1 . تعيّن قيمة $2\theta$ كالآتي:

$$\frac{2\theta}{\pi} = \frac{S}{W} \qquad \text{............. (20-5)}$$

تمثل W المسافة بين النقطتين X و Y .

تمتاز طريقة التحميل غير المتناظر (الحالة c) بأنها لاتحتاج الى عملية تصحيح

بسبب انكماش الفلم ولا الى معرفة نصف قطر الكاميرا (R) . لذا صارت هذه الحالة (c) الاكثر شيوعاً في الاستخدام في مختبرات الحيود.

## ٦-٥ اختيار الطول الموجي للشعاع:

يجب على الباحث او المشتغل في مختبر الحيود اختيار الطول الموجي الملائم للمادة المدروسة في اية طريقة من طرائق المسحوق . فيجب مراعاة نقطتين عند الاختيار هما.

١- يجب ان يكون الطول الموجي للأشعة المميزة المستخدمة اقصر من الطول الموجي لحافة الامتصاص K (K-absorption edge) الخاص بالعينة وإلا فالأشعة المتألقة المتولدة ستضبب الفلم. أما في حالة السبائك او المركبات فقد يكون من الصعب او غير الممكن تحقيق هذا الشرط لكل العناصر الداخلة في تكوين العينة .

٢- يبين قانون براك انه كلما كان الطول الموجي المستخدم اقصر كلما كانت زاوية براك الخاصة بمستويات معينة أصغر. ولذا يؤدي تقليل الطول الموجي الى ازاحة كل خط من خطوط الحيود ليأخذ زاوية حيود أصغر ومن ثم يزيد من عدد الخطوط التي تظهر على الفلم، بينما تؤدي زيادة الطول الموجي الى العكس. ويعتمد اختيار طول موجي قصير او طويل نسبياً على طبيعة المادة المدروسة. يبين الجدول (5-1) عدد من الأطوال الموجية للأشعة السينية المميزة والتي تستخدم عادة في حقل حيود الاشعة السينية.

الجدول (5-1) عدد من الأطوال الموجية للأشعة المميزة والمستخدمة عادة في مختبرات الحيود

| نوع الأشعة المميزة | الطول الموجي (Å) |
|---|---|
| Mok$\alpha$ | 0.711 |
| Cu k$\alpha$ | 1.542 |
| Co k$\alpha$ | 1.790 |
| Fe k$\alpha$ | 1.937 |
| Cr k$\alpha$ | 2.291 |

وبطبيعة الحال يجب استخدام المرشح الملائم لمنع مرور مركّبة الطول الموجي $k_\beta$ من الأشعة. ان أشعة Cuk$\alpha$ هي الأعم استخداماً من بقية الأطوال الموجية إلا أنها لايمكن أن تستخدم في حالة المواد الحديدية، لأنها تسبب أشعة متألقة من الحديد الموجود في النموذج، لذلك يستعاض عنها في هذه الحالة بواحدةٍ من الأشعة الآتية Cok$\alpha$ أو Fek$\alpha$ أو Crk$\alpha$ .

## ٧-٥ المطياف والمحياد Spectrometer & Diffractometer

كان يطلق على كل جهاز يستخدم في حقل حيود الاشعة اسم المطياف. حيث تم استخدامه من قبل براك في دراسته الاولى لطيف الاشعة السينية والبنيه البلورية. شاع بعد ذلك استخدام الكاميرات لتسجيل نمط الحيود على افلام التصوير. ثم انتجت فيـنهاية الاربعينات المطاييف بشكل تجاري وشاع استخدامها فيما بعد لمالها من ميزات على تقنية الافلام. فقد استعملت في البداية للبحوث ثم أصبحت أجهزة تستخدم للسيطرة والتحليل في العديد من المختبرات.

لقد تم تقسيم مطاييف الاشعة السينية الى نوعين من الاجهزة وحسب استخدامها :

١- الاجهزة الخاصة بقياس طيف الاشعة السينية (الطول الموجي) بوساطة بلورة معلومة البنية وسميت المطاييف (Spectrometers) .

٢- الاجهزة الخاصة بدراسة المواد البلورية وغير البلورية وذلك بدراسة الاسلوب الذي به تحيد الاشعة السينية ذات الطول الموجي المعلوم ، وسميت المحاييد (dif- fractometers) . لقد تم تحديد المحاييد وبموجب تسميتها لتحليل الحيود بدلاً من الطيف .

**١-٧-٥ المحياد Diffractometer :**

تم تصميم المحياد أساساً ليشابه كاميرة دبي- شيرر، عدا ان شريط الفلم قد استبدل بعداد متحرك . حيث تستخدم في كليهما أشعة احادية الطول الموجي وكاشف للأشعة السينية (سواء فلم او عداد) موضوع على محيط دائرة تسمى دائرة المحياد (diffractometer circle) وفي مركزها توضع عينه المسحوق . يبين الشكل (5-15) الاجزاء الأساسية للمحياد بصوره تخطيطية. تسند عينه المسحوق (C)، التي تكون مسطحة الشكل، على الطبلة (H) التي يمكن تدويرها حول المحور (O) العمود على ورقة الكتاب. (S) يمثل مصدر الأشعة السينية، حيث تسقط الاشعة السينية على العينة من خلال الفتحة القابلة للتغيير (A) ثم تحاد الاشعة عند العينة لتتجمع عند النقطة (F) مارة بالفتحة (B) ومن ثم تدخل إلى عداد الاشعة (G). يوضع المرشح عادة في طريق الاشعة المحادة ، وهو غير مبين في الشكل، حيث يستفاد من المرشح في هذه الحالة ليس فقط في منع $K_\beta$ من المرور وانما لتقليل أشعة الخلفية (Background radiation) و المتولدة أساساً من العينة.

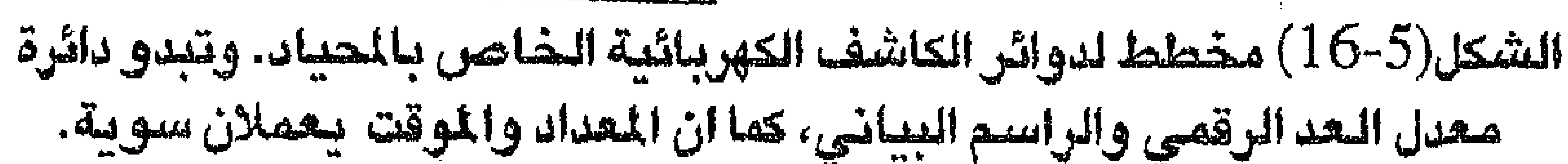


الشكل (15-5) محياد الاشعة السينية بصورة تخطيطية.

يدور العداد حول محور المحياد O حيث تتم قراءة موضعه (2θ)على المدرج (K). صمم الجهاز بحيث اذا دارت العينة زاوية مقدارها (X) يدور العداد بزاوية مقدارها (2X) وهو الشرط اللازم للحفاظ على تبئير (تجمع) الاشعة المحادة على فوهة العداد على الدوام عند التدوير.

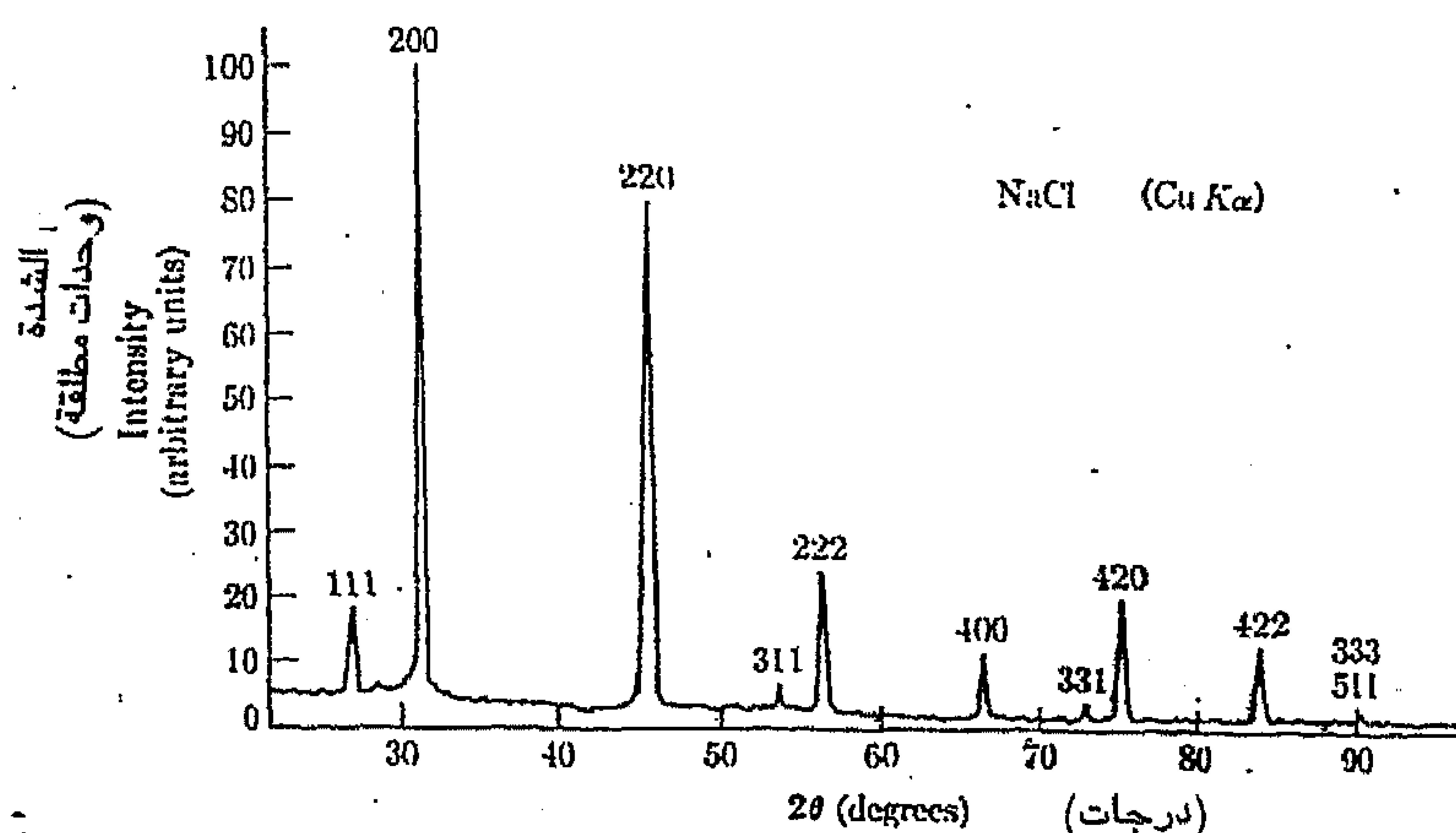
تمر النبضات الكهربائية الخارجه من العداد الى دائرة الكترونية ثم الى جهاز تسجيل ورقي (recorder) لرسم نمط الحيود على شكل نبضات او قمم، او بالتبادل الى جهاز راسم متصل بالحاسوب .

يبين الشكل (16-5) مخطط لدوائر الكاشف الخاص بالمحياد.



الشكل(16-5) مخطط لدوائر الكاشف الكهربائية الخاص بالمحياد. وتبدو دائرة معدل العد الرقمي والراسم البياني، كما ان المعداد والموقت يعملان سوية.

يمكن عندئذٍ تحليل نمط الحيود بعد تأشير مقدار زاوية البدء على ورقة المسجل وتعيين سرعة الورقة ومايقابلها من درجات لحساب مقدار زاوية كل نبضة . يوضح الشكل (5-17) نمط حيود مسحوق ملح الطعام (NaCl) وعند استخدام الاشعة السينية Cukα ($\lambda$=1.54 Å) حيث كان المرشح المستخدم هو النيكل (Ni) .




**الشكل (5-17) نمط حيود مسجل اوتوماتيكياً لمسحوق من NaCl استخدمت أشعة النحاس مع مرشح من النيكل . يظهر هنا حوالي نصف المدى الممكن للزوايا 2θ . الاعداد على محور الشدة هي اعداد نسبيه.**

## ٢-٧-٥ المطياف Spectrometer

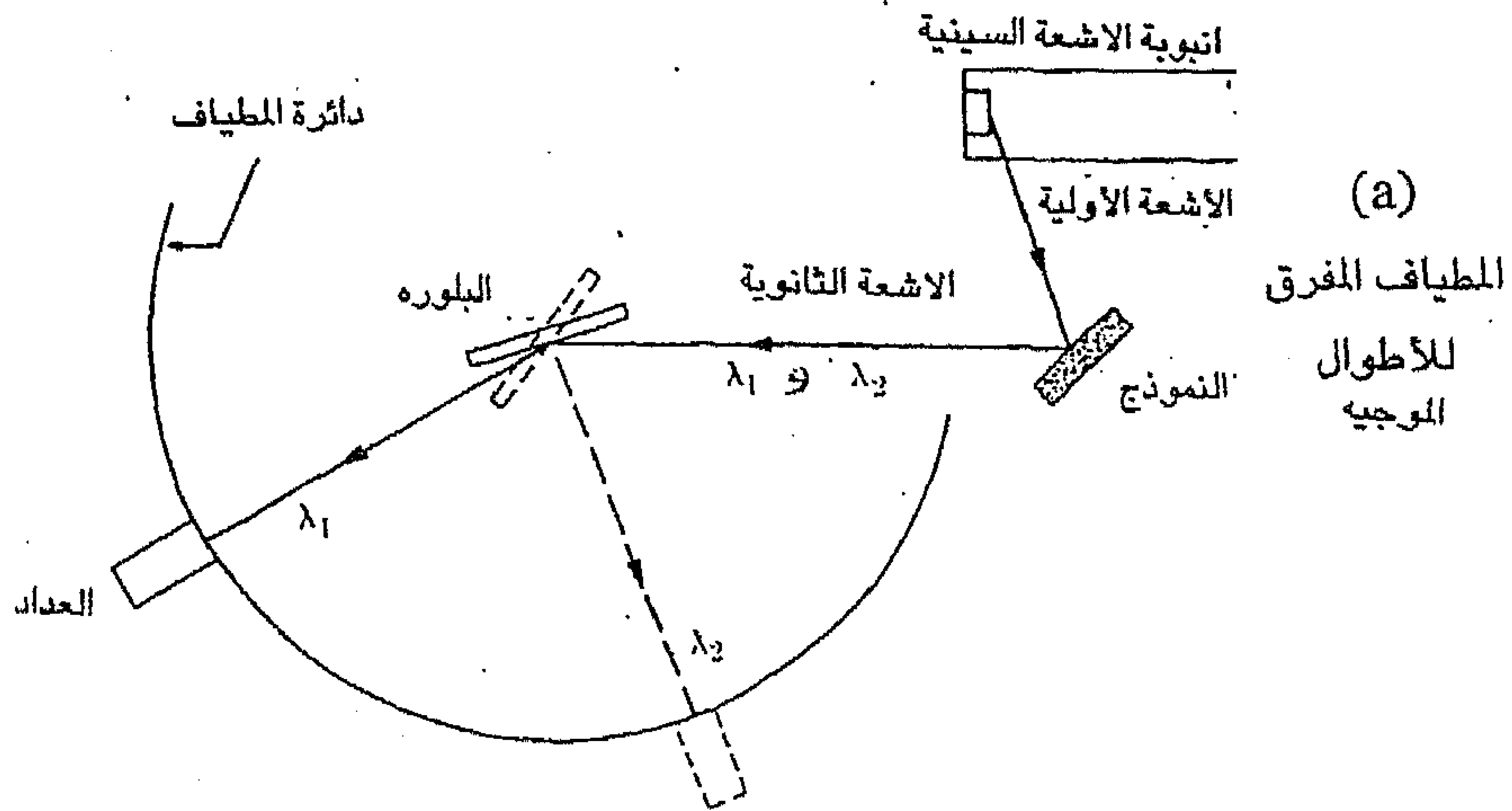
تنبعث خطوط الاشعة المميزة من العنصر إذا سقطت عليه أشعة سينيه عالية الطاقة. وقد سميت هذه الظاهرة بالتألق (fluorescence) ولذا تسمى الاشعة السينية المنبعثة بالأشعة المتألقة واحياناً بالأشعة الثانوية (Scondary X- rays) تمييزاً لها عن الأشعة الأولية الساقطة.

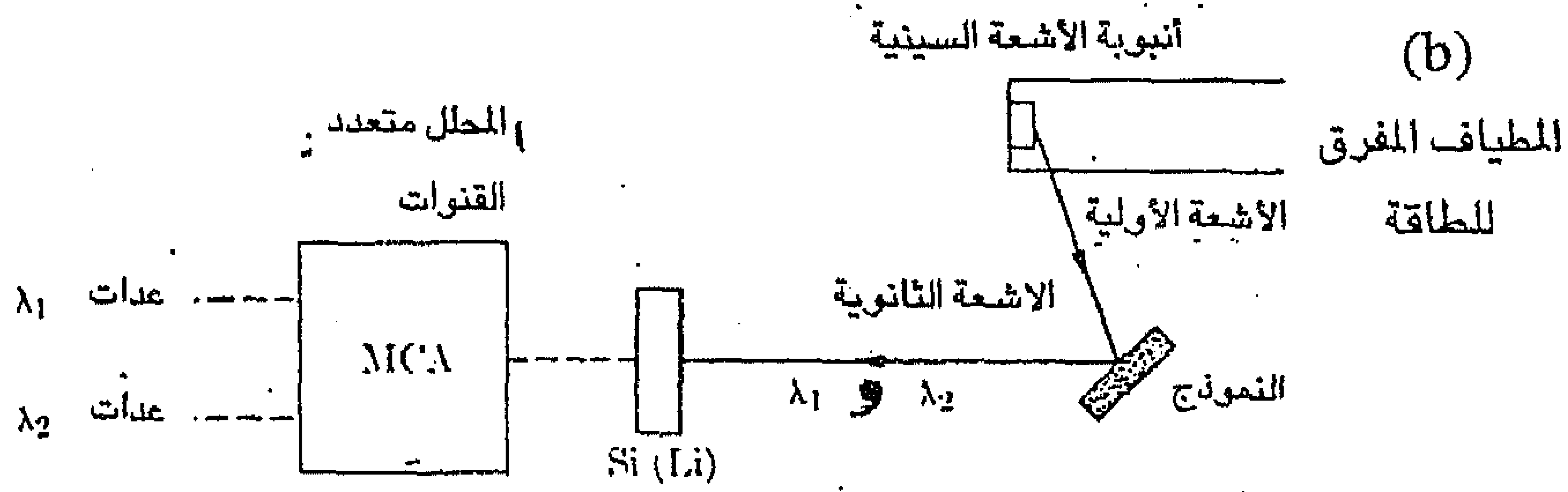
تعتبر هذه الظاهرة هي الأساس في طريقة التحليل الكيماوي بمطياف الاشعة السينية. فيتم الكشف عن كل عنصر بتحليل الاشعة المنبعثة وملاحظة وجود الاطوال الموجية الخاصة به. يتم التحليل بمطياف الاشعة السينية بتقنيتين وحسب نوع الجهاز المستخدم:

**١- المطياف المفرق للأطوال الموجية Wavelength Dispersive Spectrometer :**

ويرمز له اختصاراً بالحروف (WDS).وفيه يتم حيود الاشعة المنبعثة من العينة بمستويات شبيكة بلورة منفردة (Single crystal) معلومة التوجه (Orientation) والبنيه اي معلومة المسافات البينيه (d). فينعكس كل شعاع ذو طول موجي واحد عند كل وضع زاوي للبلوره وحسب قانون براك. يمكن قياس شدة الاشعة هذه باستخدام كاشف (detector) او عداد ملائم كما في الشكل التخطيطي (5-18) (a). وحيث ان الاطوال الموجية المختلفة تفترق او تحاد باتجاهات مختلفة في الفضاء لذا سميت هذه الطريقة بطريقة التفريق.يدعى هذا النوع من المطاييف في بعض الاحيان بمطياف البلوره (Crystal spectrometer) .

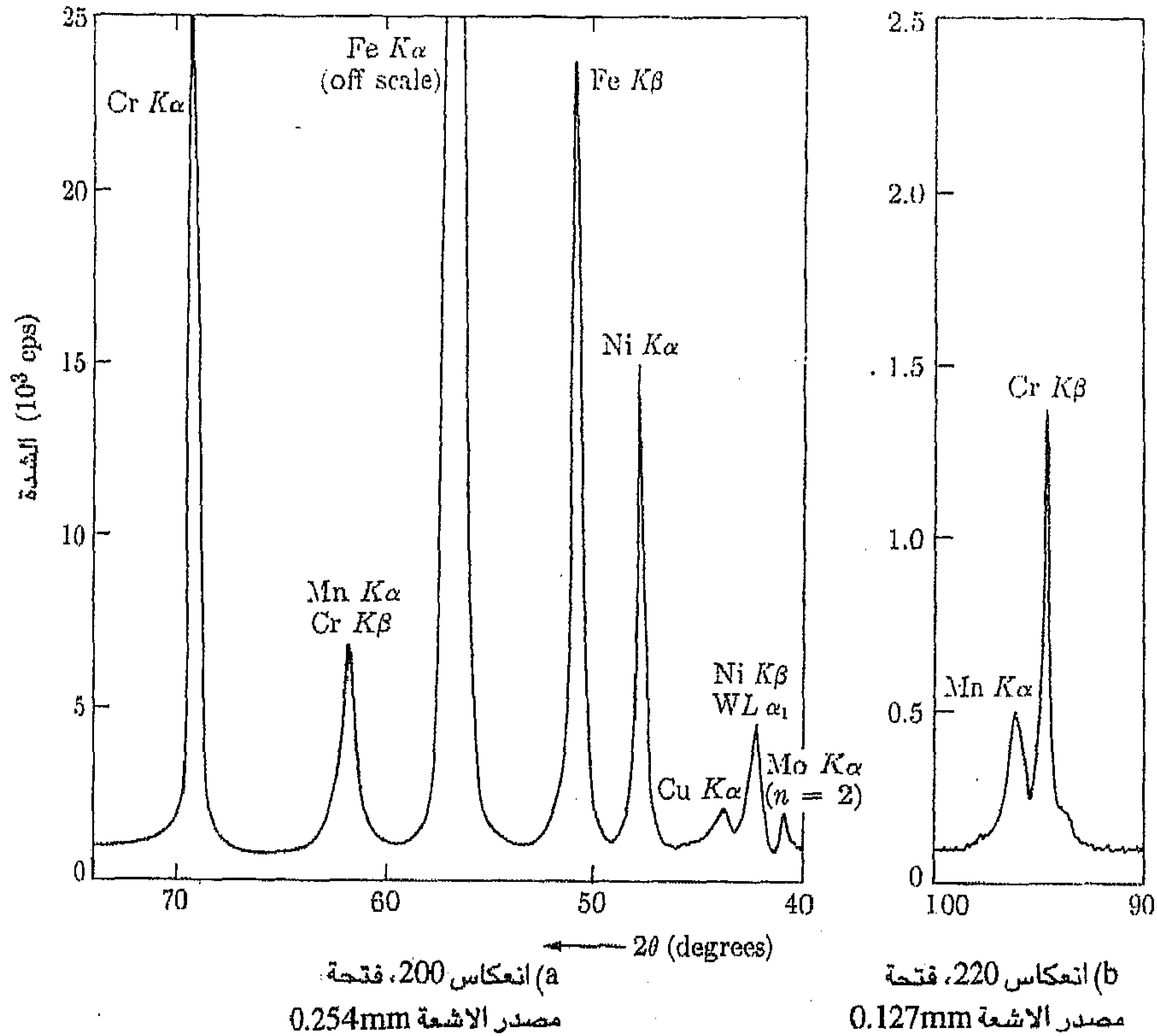
وبالإعتماد على قانون براك تتم معرفة الاطوال الموجية المميزة للعناصر الداخله في التكوين الكيماوي للعينه. وبما ان (d) ثابتة في هذه الحالة و (θ) يتم قياسها عملياً فيمكن اذن حساب الاطوال الموجية وعندئذ تقارن بالأطوال الموجية للعناصر المتوقع وجودها فإن تطابقت النتائج دل ذلك على وجود تلك العناصر في العينة. أما المقدار او النسبه المئوية لمقادير العناصر الموجودة فتحسب من ارتفاع قمم النبضات في ورقة الراسم البياني بعد عمل معايرة للعناصر الموجودة باستخدام نماذج قياسية (معلومة التكوين الكيماوي بالضبط) .




**الشكل (18-5) مطيافاً للأشعة السينية المتألقة . في هذا المثال يبعث النموذج طولين موجيين مميزين $\lambda_1$ و $\lambda_2$ يقاس الطولان الموجيان هذان بوساطة حيود البلورة في (a) او بوساطة تحليل ارتفاع النبضة (الطاقة) في (b)، MCA = multichannel analyzer.**

يبين الشكل (19-5) طيف فولاذ مقاوم للصدأ مثار بأشعة سينيه اوليه من انبوبه ذات هدف من البلاتين. تظهر في الشكل خطوط K لكل المكونات الاساسية Fe و Cr و Ni وبعض المكونات الثانوية Mo و Mn . يوجد أيضاً أحد خطوط L لعنصر التنكستن(W) .

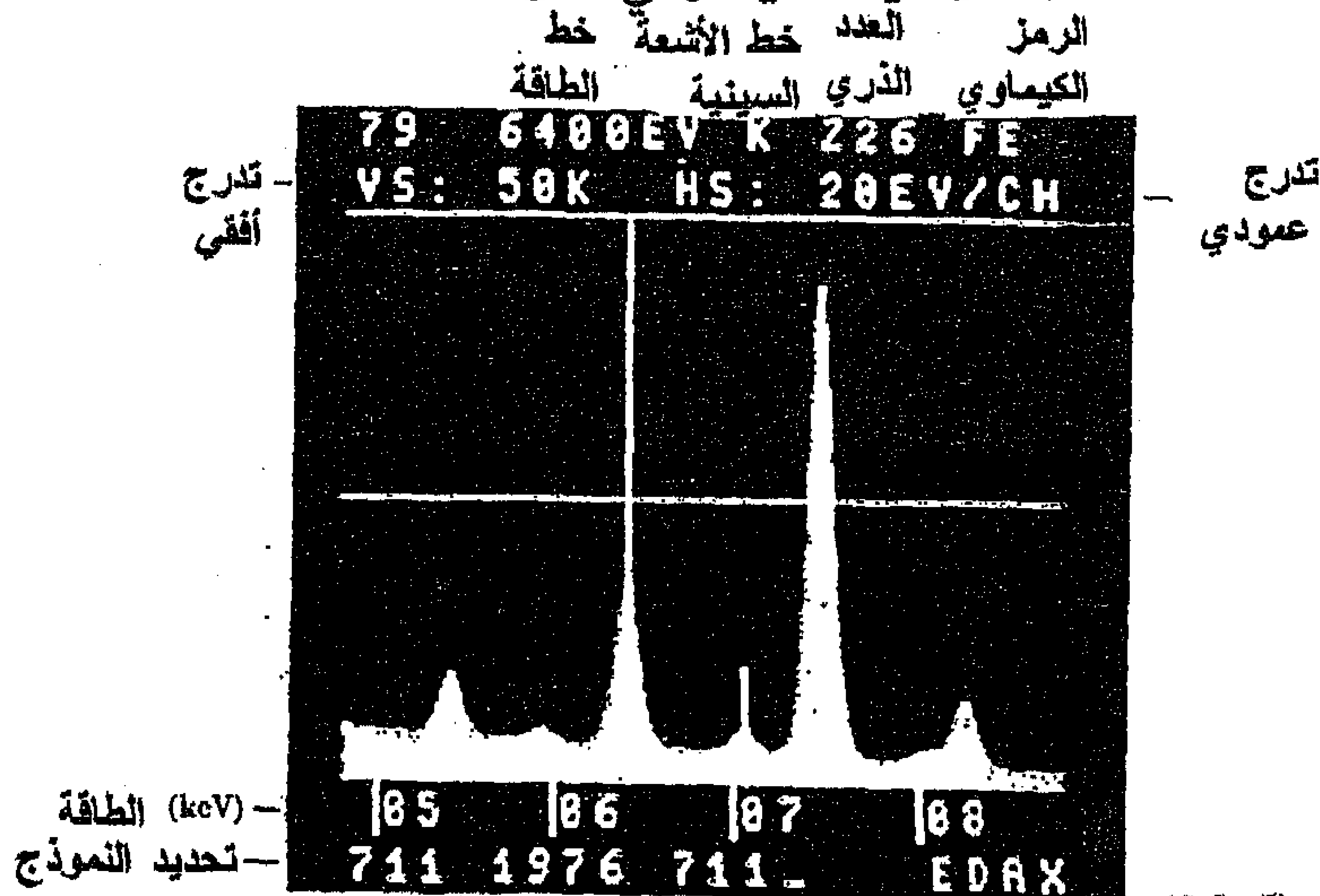



**الشكل (19-5) طيف التألق المسجل للفولاذ المقاوم للصدأ و المحتوي على Cr 19.4 و Ni 9.5 و Mo 1.5 و W 1.4 و Mn 1.0 المقادير هي وزناً بالمئة اما المتبقي فهو الحديد (Fe) . استخدمت في هذا التحليل بلوره منفرده مسطحة من LiF . كان معدن الهدف في انبوبة الاشعة هو Pt عند 40m A و 50 kV .**

كانت انبوبة الأشعة ، لهذا الشكل، مشتغلة عند 50kV و 40mA . وقد كانت البلورة المنفردة المستخدمة في الجهاز هي LiF وباتجاه الانعكاس 200 . أما مقادير العناصر الداخله في التكوين الكيماوي للعينه فقد كانت كالآتي (وزناً بالمئة) 19.5 Ni و 19.4 Cr , و 5.5 Mo و 1.4 W و 1.0Mn , اما العنصر المتبقي فهو الحديد (Fe) .

## ٢- المطياف المفرق للطاقة: Energy Dispersive Spectrometer (EDS)

لاتدخل عملية الحيود في هذا النوع من المطاييف. فيتم فصل مختلف الأطوال الموجية للأشعة المنبعثة من العينة على أساس طاقاتها بوساطة عداد(Si (Li ومحلل القنوات المتعددة (MCA)Multichannal analyzer). يولد العداد نبضات تتناسب في ارتفاعها مع طاقات الشعاع الساقط عليه، ومن ثم يفرق محلل القنوات المتعددة مختلف ارتفاعات النبضات كما في الشكل (8-18) b . وحيث ان هذه العملية لاتتضمن تفريق فيزياوي في المجال للأطوال الموجبة (الطاقات) تسمى مثل هذه المطاييف، في بعض الاحيان ، المطاييف غير المفرقة (nondispersive) .يعتبر هذا النوع من المطاييف احدث من النوع الأول. يبين الشكل (5-20) نموذجاً لتسجيل نبضات مختلفة الطاقات صادرة من عينه معينه وفي مدى محدد.



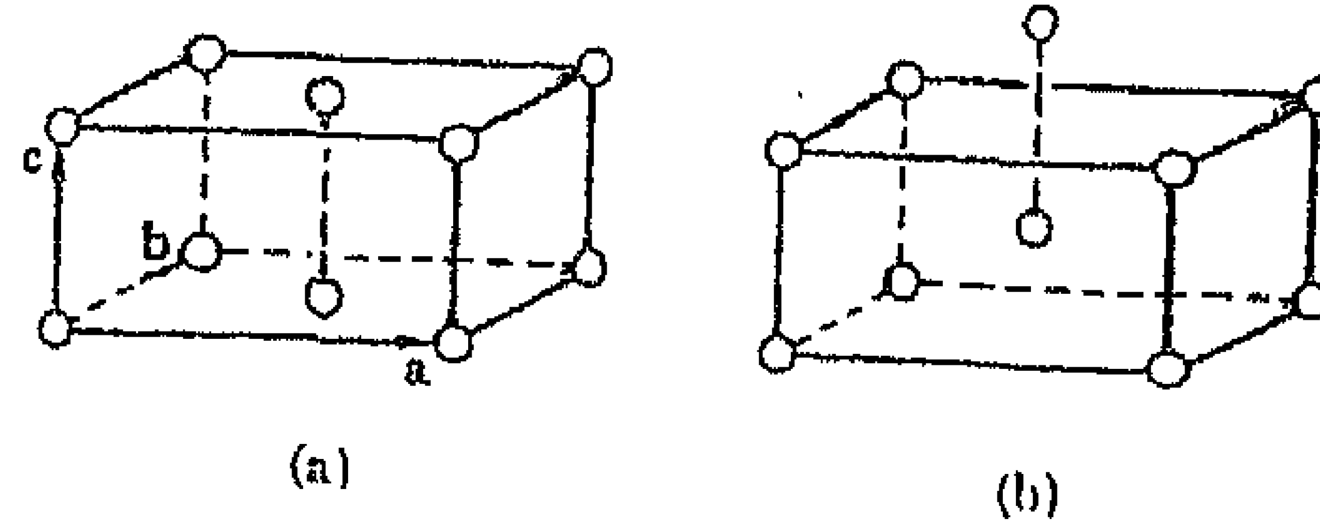

الشكل (5-20) عرض صورة النبضات في المطياف المفرق للطاقة.

## ٨-٥ مستويات الانعكاس الممكنة ومعامل البنية الذرية "F":

## Possible Reflecting Planes and Atomic Structure Factor

### ١-٨-٥ المقدمة:

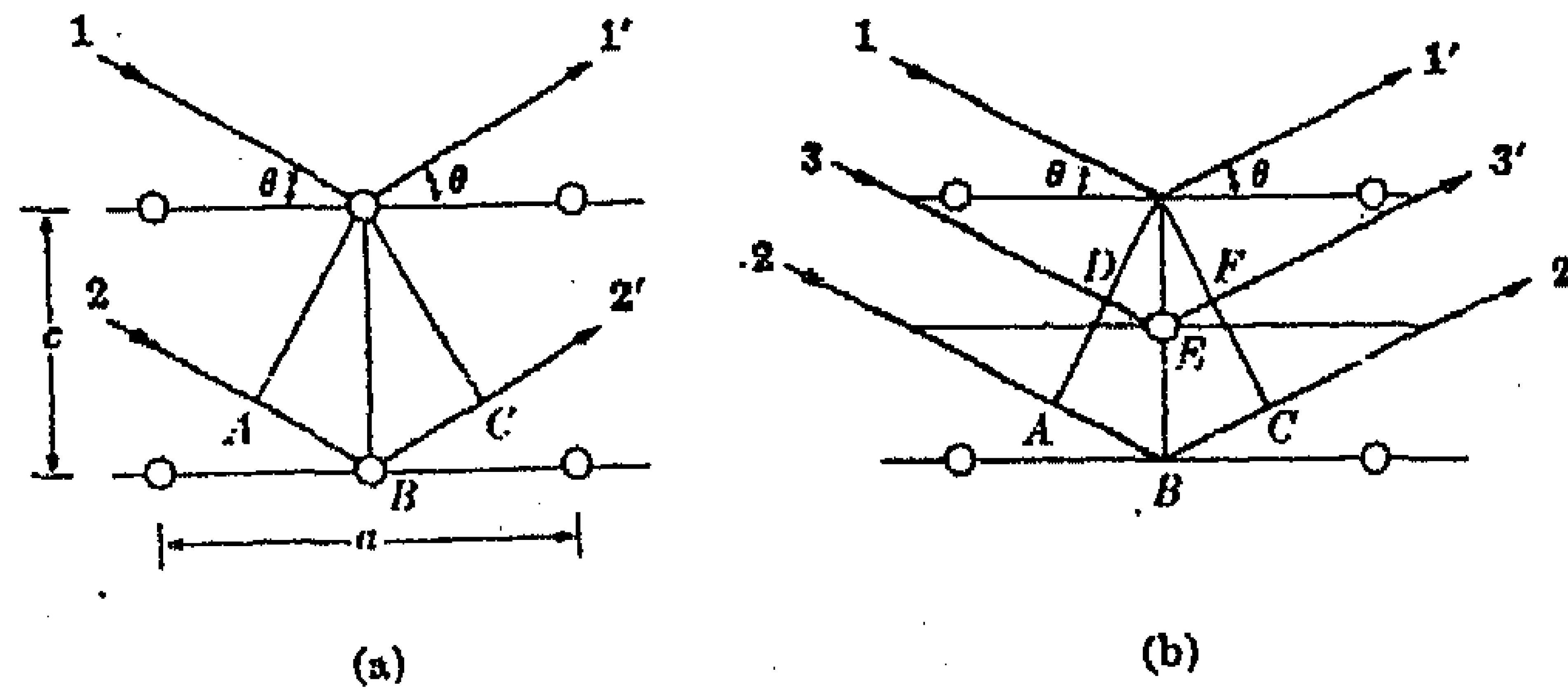
ذكرنا سابقاً ان مواضع الذرات في الخلية الاساسية تؤثر عل شدة الحزم المحادة وليس على اتجاهها. يمكن ملاحظة ذلك عند دراسة البنيتين البلوريتين المبينتين في الشكل (5-21). فكلا البنيتين متعامدة الاضلاع (orthorhombic) وتحتوي على ذرتين من نفس النوع في الخلية الاساسية، إلا أن إحداهما (على اليسار) متمركزة القاعدة والثانية (على اليمين) متمركزة الجسم. ويمكن تحويل كل منهما الى الأخرى بإزاحة بسيطة بمقدار المتجة $\frac{1}{2}c$.




**الشكل (5-21) متعامد الاضلاع متمركز القاعدة في (a) ومثله متمركز الجسم في (b).**

فلو تم فرض ان الانعكاسات تحدث من المستويات (001)المبين مقطعها في الشكل (5-22) وان قانون براك يتحقق عند القيم المحدده من $\lambda$ و $\theta$ في الحالة (a) للشبيكة البلورية المتمركزة القاعدة. يعني هذا ان فرق المسار ABC بين الشعاعين `1

و `2 مساوياً لطول موجي واحد، لذلك يكون الشعاعان `1 و `2 في حالة توافق طوري ولذا يحدث حيود في الاتجاه المبين. وبالتشابه يكون الشعاعان `1 و `2 في توافق طوري في الحالة (b) (للشبيكة البلورية المتمركز الجسم) لأن فرق المسار ABC مساوٍ لطول موجي واحد ايضاً لكنه في هذه الحالة هناك مستوي بلوري آخر في منتصف المسافة بين المستويات (001) ، وفرق المسار DEFبين الشعاعين `1 و `3 هو بالضبط نصف ABC او ما يساوي لنصف الطول الموجي . لذا يكون الشعاعان `1 و `3 في حالة فرق طوري تام ومن ثم يمحو كل منهما الآخر ويتلاشيان. وبالتشابه يمحو الشعاع `2 تأثير الشعاع `4 (غير مبين في الشكل) المنعكس من المستوى السفلي. وهكذا الحال خلال تمام البلورة. يستنتج من هذا اذن أنه لايوجد انعكاس من المستويات (001) في حالة البنية المتمركزة الجسم.




**الشكل (5-22) حيود من المستويات (001) للخلية المتمركزة القاعدة في (a)ولخلية متمركزة الجسم في (b) وكلتاهما من شبيكة متعامدة المحاور.**

يبين هذا المثال ان التغيير البسيط في ترتيب الذرات داخل الخلية الأساسية يمكن ان يزيل الانعكاس تماماً. وبصوره عامة تتغير شدة الشعاع المحاد مع اي تغيير في مواضع الذرات وليس بالضرورة ان تكون صفراً. وبالعكس يمكن تعيين مواضع الذرات بملاحظة الشدات المحادة. ولأجل وضع علاقة رياضية بين موضع الذره والشده المحادة يلزمنا دراسة كيفية استطارة الاشعة السينية بالإلكترون ثم بالذرة وأخيراً بالخلية الاساسية. لأن الخلية الاساسية تتألف من ذرات والذرة فيها الكترونات لذا فالعملية معقدة لكنه سنحاول التبسيط قدر المستطاع للوصول الى النتيجة النهائية. أضف الى ذلك فهناك عوامل أخر تؤثر على خطوط نمط حيود المسحوق ايضاً.

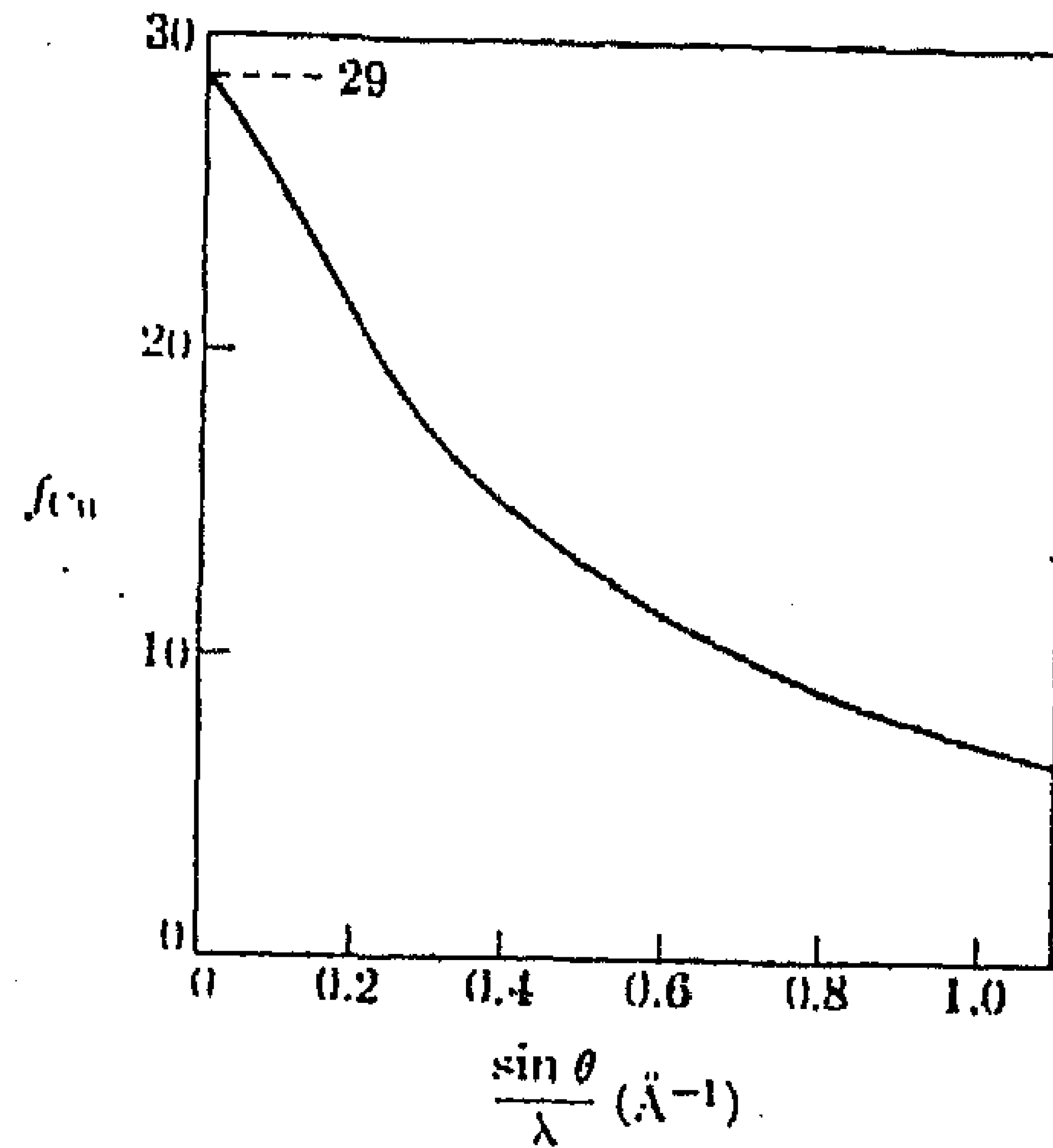
### ٢-٨-٥ الاستطارة بالإلكترون وبالذرة Scattering by an electron and atom

لو فرضنا ، للإختصار، ان شعاعاً أحادي الموجه من الأشعة السينية سقط على ذره ما فسيحدث نوعان من الاستطاره. تتذبذب الالكترونات المرتبطة بقوة الى الذرة وتبعث اشعة سينية لها نفس الطول الموجي للشعاع الساقط. أما الالكترونات غير المقيدة او الحرة فتستطير جزء من الشعاع الساقط ويزداد طوله الموجي قليلاً في هذه العملية، أما مقدار الزيادة فتعتمد على زاوية الاستطاره. تدعى العملية الأولى استطارة متوافقة او غير محوره والثانية استطاره غير متوافقة او محوره. تحدث كلا العمليتين في آن واحد وبكل الاتجاهات. وإذا كانت الذره واحدة من مجموعة كبيرة من الذرات مرتبة في الفضاء بصورة منتظمة ومعادة كما في حالة المواد البلورية فستحصل عند ذلك ظاهرة أخرى. فستعمل الاشعة المستطارة بتوافق من كل الذرات على التقوية في اتجاهات معينة وعلى التلاشي في الاتجاهات الاخرى ومن ثم تتولد الاشعة (الحُزم) المحادة. فالحيود أساساً هو استطارة متوافقة مقواة.

تستخدم الكمية f والمسماة معامل الاستطارة الذري لوصف كفاءة استطارة ذرة محدده باتجاه معين. يعرف (f) رياضياً بنسبة السعتين وكالآتي

$$f = \frac{\text{سعة الموجه المستطارة من ذرة واحده}}{\text{سعة الموجه المستطارة من الكترون واحد}}$$

يعتمد (f) على زاوية الاستطارة وعلى الطول الموجي عند زاوية معينة . يبين الشكل (5-23) تغيّر (f) للنحاس مع زاوية الاستطارة والطول الموجي.




**الشكل (5-23) معامل الاستطارة الذري للنحاس**

## ٣-٨-٥ الاستطارة بالخلية الاساسية Scattering by a unit cell

للوصول الى صيغة رياضية لشدة الشعاع الحاد يجب الاقتصار على دراسة الاستطارة المتوافقة (Coherent Scattering) من كل الذرات التي تكوّن البلوره وليس

ذرة واحدة فقط. فالواقع ان الذرات المرتبة بشكل منتظم في الفضاء تعني ان الاشعة المحادة محددة باتجاهات معينة فقط وتسمى الحزم المحاده. تحدد هذه الاتجاهات بقانون براك. فعند عدم تحقق قانون براك فلا يمكن ان يوجد شعاع محاد في حين ان قانون براك يمكن ان يتحقق في بعض مجاميع المستويات الذرية ومع ذلك لايحدث حيود كما في المثال المذكور في مقدمة هذا البند وذلك بسبب الترتيب الخاص للذرات في داخل الخلية الاساسية.

وبما أن البلورة مكوّنه من خلايا أساسية معاده لذلك تكفي دراسة شدة الشعاع المحاد من خلية أساسية واحده لتمثيل كل البلورة.

تدعى محصلة الموجه المستطاره بكل الذرات في الخلية الاساسية بمعامل البنيه (structure factor) (F)، وذلك لانه يصف كيفية تأثير ترتيب الذرات (بدلالة احداثيات كل ذره u v w ) على الشعاع المستطار. يتم الحصول على (F) بالإضافة البسيطة للموجات المستطاره من كل ذرة في الخلية الاساسية على حده. فإذا احتوت الخلية الاساسية على 1 و 2 و 3 .....N من الذرات ولها الاحداثيات $u_1\ v_1\ w_1$ و $u_2$ $v_2\ w_2$ و $u_3\ v_3\ w_3$ .. ولها معاملات استطاره ذرية $f_1$ و $f_2$ و $f_3$ ... فعندها يتم التعبير عن (F) ولانعكاس hkl بالآتي:

$$F=f_1e^{2\pi i(hu_1+kv_1+Lw_1)}+f_2e^{2\pi i(hu_2+kv_2+lw_2)}$$

$$+f_3e(2\pi i\ hu_3+kv_3+lw_3)+\dots\dots\dots\dots +\qquad \dots\dots\dots(21\text{-}5)$$

حيث أن $i=\sqrt{-1}$ وهو مقدار تخيلي

يمكن كتابة المعادلة الاخيرة كالآتي

$$F_{hkl}=\sum_{I}^{N} f_n e^{\,2\pi i(hu_n+kv_n+lw_n)} \qquad \dots\dots\dots(22\text{-}5)$$

حيث تمثل Nعدد الذرات الموجودة في الخلية الاساسية المدروسة.

تكون (F)، بصوره عامة، عدد مركب (complex number) وهو يعبر عن كل من السعة (A) والطور للموجه المحصلة. تعطي قيمة (F) المطلقة |F| سعة الموجه المحصلة بدلالة سعة الموجه المستطارة بإلكترون منفرد وهو يعرف بنسبة السعتين وكالآتي:

$$|F| = \frac{\text{سعة الموجه المستطارة بكل الذرات في الخلية الأساسية}}{\text{سعة الموجه المستطارة بألكترون واحد}}$$

تتناسب شدة الحزم الحادة بكل الذرات في الخلية الاساسية، بالإتجاه المحدد بقانون براك،مع $|F|^2$ . يتم الحصول على مربع سعة الحزمة الناتجة و $|F|^2$ بضرب العلاقة الخاصة بالمعامل F (5-22) بمرافقها المركب (Complex conjugate). تعتبر المعادلة (5-22) مهمة جداً في حيود الاشعة السينية لدراسة البلورات لانها تمكّن بوساطة حساب شدة اي انعكاس hkl من معرفة مواقع الذرات.

### ٤-٨-٥ حساب معامل البنيه (F) :

لحساب معامل البنية (F) يجدر هنا التذكير ببعض العلاقات الرياضية المفيدة وهي:

a- $e^{n\pi i} = (-1)^n$

b- $e^{n\pi i} = e^{-n\pi i}$

حيث ان n هي عدد صحيح

تستخدم المعادلة (5-22) لحساب (F) لأية بنية بلوريه، على سبيل المثال، (a) حالة البنية البسيطة (كالمكعب البسيط ومتعامد الاضلاع البسيط وغيرها). تحتوي الخلية الاساسية في هذه الحالة على ذرة واحدة في نقطة الاصل، اي أن لها الاحداثيات 000 . فيكون معامل البنيه:

$$F = fe^{2\pi i\,(0)} = f$$

ومن ثم

$$F^2 = f^2$$

وحيث ان $F^2$ لايعتمد على h و k و l اي هو ثابت لكل الانعكاسات، لذا يعني ذلك انه يمكن حدوث الحيود على كل المستويات الذرية (مستويات الانعكاس) hkl. ومن الجدير بالذكر أن شدة خط الحيود (I) تتناسب طردياً مع $|F^2|$.

(b) حالة الخلية المتمركزة القاعده التي نوقشت عند بداية البند (١-٨-٥) . تحتوي هذه الخلية على ذرتين من نفس النوع ذات الإحداثيات 000 و $\frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ 0$ . وعليه يكون

$$F = fe^{2\pi i(0)} + fe^{2\pi i\left(\frac{h}{2} + \frac{k}{2}\right)} = f[1 + e^{\pi i(h+k)}]$$

وحيث ان (h+k) هي عدد صحيح دائماً، لذا تكون (F) حقيقيه وليست مركبة (Complex) .

فإذا كانت كل من h و k زوجيه او فردية اي غير مختلطة (unmixed) اذن يكون مجموعهما دائماً زوجي ومن ثم تكون قيمة $e^{\pi i\,(h+k)}$ تساوي واحد .

اذن اذا كانت h و k غير مختلطة فتكون $F = 2f$ or $F^2 = 4f^2$

ومن الجانب الآخر إذا كانت h و k مختلطة اي ان احدهما فردي والآخر زوجي، فإن مجموعهما سيكون فردياً وتكون قيمة $e^{\pi i(h+k)}$ مساوية لسالب واحد (1−).

اذن اذا كانت h و k مختلطة فإن:

$$F = 0 \quad \text{or} \quad F^2 = 0$$

ومن الملاحظ هنا في كلا الحالتين ان قيمة l لاتؤثر على معامل البنيه. وعلى

سبيل المثال ، فإن الانعكاسات 111 و 112 و 021 و 022 و 023 كلها تمتلك نفس قيمة F والمساوية 2f . وبالتشابه فإن الانعكاسات 011 و 012 و 013 و 101 و 102 و 103 لها نفس قيمة معامل البنيه F والمساوية للصفر.

(c) حالة الخلية المتمركزة الجسم (body centered cell) والمبينه في الشكل (5-21) b ، تحتوي هذه الخلية على ذرتين من نفس النوع موضوعه في 000 و $\frac{1}{2}\ \frac{1}{2}\ \frac{1}{2}$

وحسب المعادلة (5-25) يكون

$$F = fe^{2\pi i(0)} + fe^{2\pi i\left(\frac{h}{2} + \frac{k}{2} + \frac{l}{2}\right)}$$

$$= f[1 + e^{\pi i(h+k+l)}]$$

عندما تكون قمة المقدار (h+k+l)زوجية فإن $F=2f$

اي يحدث انعكاس في هذه الحالة . $F^2 = 4f^2$

أما عند كون قيمة المقدار (h+k+l)فردية فإن $F = 0$

اي لايحدث انعكاس في هذه الحالة . $F^2 = 0$

لقد تم بموجب الاعتبارات الهندسية استنتاج حدوث الانعكاس 011 في الخلية متمركزة القاعده لكنه لايحدث هذا الانعكاس في الخية متمركزة الجسم. هذه النتيجة في الواقع على توافق مع معادلات عامل البنيه (F) لهاتين الخليتين .

وهكذا يمكن تطبيق معادلة معامل البنيه (5-22) لحساب مقداره ومن ثم معرفة الممكن من الانعكاس في كل البنى البلورية.

ويمكن استنتاج بعض القواعد الخاصة بالإنعكاسات الممكنة وغير الممكنة لبعض الخلايا البلورية الشائعة واختصارها كما في الجدول (5-2) .

جدول (5-2) الانعكاسات الممكنة وغير الممكنة لبعض البنى البلورية.

| بنية الخلية | الممكن وجوده من الانعكاسات | الواجب عدم وجوده من الانعكاسات |
|---|---|---|
| - بسيطة Simple | الكل | لا يوجد |
| - متمركزة القاعده | عند كون h و k غير مختلطه | عندما تكون h و k مختلطة |
| - متمركزة الجسم | عند كون (h+k+l) زوجيه القيمة | عند كون (h+k+l) فردية القيمة |
| - متمركزة الوجه | عند كون h و k و l غير مختلطة | عند كون h و k و l مختلطة . |

وهكذا يمكن تعيين بنية الخلية الاساسية من الموقع الزاوي ($\theta$) للحيود وتعيين مواضع الذرات (أحداثياتها) في الخلية الاساسية من شدة نقاط او خطوط نمط الحيود . حيث تكون قيمة المعامل ($h^2+k^2+l^2$) للخلية المكعبة مساوية الى القيم الآتية:

أ- ذات البنية البسيطة .S.C    1 و 2 و 3 و 4 و 5 و 6 .......

ب- ذات البنية المتمركزة الجسم .BCC    2 و 4 و 6 و 8 و 10 و 12 و 14 ....

جـ- ذات البنية المتمركزة الوجه FCC    3 و 4 و 8 و 11 و 12 و 16 ....

د- بنية بلورة الماس    3 و 8 و 11 و 16 .....

ويمكن الرجوع الى المصادر الموجودة في آخر الكتاب للإطلاع على طرائق تعيين ادلة ملر لانماط الحيود لمختلف انواع البلورات.

## ٩-٥ تحليل الحيود

### ١-٩-٥ المقدمة:

لقد تم ذكر ان نمط الحيود هوخاصية من خواص المادة والتي يمكن تشخيصها بواسطتها تماماً كطبع الاصابع بالنسبة للأشخاص . فلو فرض ان هناك عدد كبير من أنماط الحيود ومن مواد مجهولة، فالطريقة هي ان تقارن هذه الانماط مع انماط الحيود من المواد المعروفة وعند التطابق يتم تشخيص المادة. ولكن ذلك يتطلب وجود اعداد كبيرة جداً من أنماط الحيود ولكافة المواد تقريباً، مما يجعل هذه الطريقة صعبة وغير عملية. لذلك تم اعتماد نظام (System)لتصنيف انماط الحيود المعروفة وفقاً لبعض المعايير، وبذلك تكون المقارنة والتشخيص سريعين نسبياً.

لقد ابتدع هنوالت (Hanawalt) سنة 1936 نظاماً يمكن بواسطته اجراء المقارنة لتشخيص المواد من أنماط الحيود الخاصة بها، لان كل خط حيود يتميز بزاوية (2θ) وشدة (I) معينين. ولكن الزاوية (2θ) تعتمد على طول موجة الأشعة المستخدمة في الفحص (λ) ،لذلك تم استخدام عامل اساسي آخر هو المسافة البينيه (d) بين المستويات الذرية التي تحدد بموقع خط الحيود ايضاً. صنّف هنوالت انماط الحيود، بناءً على ذلك ، بجدولة قيم (d) والشدة النسبية (I) لخطوط الحيود في كل نمط.

تم ترتيب الانماط المعروفة وفقاً لقيم (d) التناقصية للخطوط ذات الشدة العالية. تجعل هذه الطريقة تطابق النمط المجهول مع النمط المعلوم سهلاً وسريعاً. كما ان لهذه الطريقة فائدة اضافية وهي عدم الحاجة لتعيين البنيه البلورية (crystal structure) للمادة في كل حالة.

### ٢-٩-٥ طريقة هنوالت:

بدأ هنوالت ومساعده عملية جمع أنماط الحيود المعروفة للمواد.حيث تمكنوا من

الحصول على أنماط حيود الف ماده تقريباً تبعهم بعد ذلك بعض الجمعيات العلمية العالمية. أمكن جمع وتبويب المعلومات في بطاقات 3x5 انج، كتلك الموجودة في الشكل (5-24) ، لحوالي 6000 مادة تتراوح بين المعادن والسبائك الى المواد العضوية وغير العضوية.

تتشابه الى حد كبير قيم (d) للخطوط الأولى من الحيود ذات الشدة العالية، ولذلك بدأ هنوالت بفحص كل مادة بقياس قيم (d) لثلاث خطوط ذات الشدة العالية اي $d_1$ و $d_2$ و $d_3$ وبذلك ضمن عدم تداخل انماط الحيود المتشابهة المسافة البينيه الأولى ($d_1$) . وقد خصص لكل مادة في هذا النظام بطاقة خاصة تحتوي على كثير من المعلومات الخاصة بالبنيه. تصاحب هذه البطاقات دليل للإستعمال واستخلاص المعلومات منه (ASTM diffraction data) .

### ٣-٩-٥ أسلوب تحليل نمط الحيود بهذه الطريقة:

هناك عدة أنماط مهمة يجب اتباعها لتشخيص نمط الحيود لمادة مجهولة وهي:

١- يجب ترتيب الشدة النسبية $\frac{I}{Io}$ وقيم d لنقاط او خطوط الحيود المقاسة عملياً من نمط حيود المادة المجهولة حيث ان Io هي شدة اعلى خط.

٢- يتم البحث عن قيم مجموعة $d_1$ في دليل البطاقات .

٣- يتم البحث عن قيم المجموعتين $d_2$ و $d_3$ لايجاد اقرب تطابق مع القيم العملية ولابد من تجاوز التفاوت بحدود ($0.01\ \mathring{A}$) .

بعد اكتشاف التوافق في قيم $d_1$ و$d_2$ و$d_3$ المقاسة والواردة في الدليل تتم مقارنة الشدة النسبية لنقاط او خطوط الحيود العائدة لقيم $d_1$ و $d_2$ و $d_3$ وعند التطابق يكون التشخيص قد اكتمل .

٤-٩-٥ خاتمة:

الواقع انه في الوقت الحاضر وبعد ان حوّسبت (Computerised) اجهزة المطياف (سواء EDS أو WDS ) وكذلك المحياد ، فإن طيف المادة او نمط حيودها يحلل بواسطة البرامجيات (soft ware)المهيأه مسبقاً لذلك وحسب الشركة المصنعة للجهاز .وبناء على نفس الاسس التي تم شرحها . لذلك لاتوجد الآن صعوبة في تحليل المواد كخامات المعادن والفوسفات والبوتاس وغيرها اضافة الى المعادن والسبائك وبنسب عالية من الدقة وخصوصاً عند توفر النماذج القياسية .

(1) 5-628  (2)  (3)  (4)

| d | 2.82 | 1.99 | 1.63 | 3.26 | NaCl | ★ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $I/I_1$ | 100 | 55 | 15 | 13 | Sodium Chloride | (Halite) |

(5)
Rad. $CuK\alpha_1$ λ 1.5405 Filter Ni Dia.
Cut off $I/I_1$ Diffractometer I/I cor.
Ref. Swanson and Fuyat, NBS Circular 539, Vol. 2, 41 (1953)

(6)
Sys. Cubic S.G. Fm3m (225)
$a_0$ 5.6402 $b_0$ $c_0$ A C
α β γ Z 4 Dx 2.164
Ref. Ibid.

(7)
εα nωβ 1.542 εγ Sign
2V D mp Color Colorless
Ref. Ibid.

(8)
An ACS reagent grade sample recrystallized twice from hydrochloric acid.
X-ray pattern at 26°C.
Merck Index, 8th Ed., p. 956.

FORM M-2

(9)

| d A | $I/I_1$ | hkl | d A | $I/I_1$ | hkl |
|---|---|---|---|---|---|
| 3.258 | 13 | 111 | | | |
| 2.821 | 100 | 200 | | | |
| 1.994 | 55 | 220 | | | |
| 1.701 | 2 | 311 | | | |
| 1.628 | 15 | 222 | | | |
| 1.410 | 6 | 400 | | | |
| 1.294 | 1 | 331 | | | |
| 1.261 | 11 | 420 | | | |
| 1.1515 | 7 | 422 | | | |
| 1.0855 | 1 | 511 | | | |
| 0.9969 | 2 | 440 | | | |
| .9533 | 1 | 531 | | | |
| .9401 | 3 | 600 | | | |
| .8917 | 4 | 620 | | | |
| .8601 | 1 | 533 | | | |
| .8503 | 3 | 622 | | | |
| .8141 | 2 | 444 | | | |

الشكل (24-5) النموذج القياسي 3x5 in لبطاقة معلومات الحيود الخاصة بمادة (NaCl) . يظهر في البطاقة (1) رقم الملف (2) ثلاثة خطوط لاقوى شده (3) خط الزاوية الأقل (4) الصيغة الكيمياوية واسم المادة (5) معلومات حول طريقة الحيود المستخدمة (6) معلومات عن الماهية البلورية للمادة (7) معلومات ضوئية اضافة الى معلومات أخرى (8) معلومات عن النموذج و (9) نمط الحيود. تم التعبير عن شدات الحيود بالنسبة المئوية لأقوى شده (I1) وهي شدة الخط الثاني في هذه المادة. لمعظم البطاقات رمز في الزاوية اليمنى العليا الذي يرمز الى نوعية المعلومات.

## تمارين الفصل الخامس

١- في نمط حيود أحد العناصر الذي بنيته البلوريه على هيئة مكعب متمركز الوجه FCC، كانت مقادير زاوية الحيود (θ) للخطوط الثلاثة الاولى $22^{\circ}$ و $26.3^{\circ}$ و $37.4^{\circ}$ ، حدد ذلك العنصر ، علماً ان الاشعة السينية المستخدمة هي Cu- kα .

٢- جد قيمة 2θ وأدلة ملر لخطوط الحيود الثلاثة الاولى ذات الزوايا الصغيرة في نمط حيود المسحوق للمواد التي لها الانظمة البلورية التالية:

أ- مكعب بسيط: (a=3Å)

ب- مكعب متمركز الجسم (a= 2Å)

جـ-رباعي بسيط (a=3Å , c= 2Å)

علماً بأن الاشعة السينية الاحادية المستخدمة كانت Cu-kα .

٣- سقطت حزمة من الاشعة السينية بصوره أفقيه وموازيه للمحور [010] وعمودية على المحور [100] لبلوره مكعبة البنيه, طول حرف (ضلع) خليتها الاساسية (6Å) اذا علمت ان المحور [001] كان موازياً لشريط الفلم الذي يبعد عن البلورة (5 cm)، حدد مواقع بقع الحيود على الفلم .

٤- تم الحصول على نمط الحيود لمسحوق الالمنيوم باستخدام الاشعة السينية (Cokα). كانت مربعات جيوب زوايا خطوط الحيود ($Sin^2θ$) هي 0.0818 و 0.1091 و 0.2182 و 0.3274 . جد أدلة ملر لخطوط الحيود المذكورة ثم احسب ثابت البلوره.

٥- اشتق علاقة بسيطة لمربع معامل البنية الذرية ($F^2$) للماس بضمنها القواعد التي تتحكم بالانعكاسات المشاهدة. بنية هذه البلورة مكعبة وتحتوي على 8 ذرات كربون، في كل خلية أساسية، متموضعة في الاماكن ذات الاحداثيات التالية:

$000, \frac{1}{2}\frac{1}{2}0, \frac{1}{2}0\frac{1}{2}, 0\frac{1}{2}\frac{1}{2}, \frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}, \frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}, \frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}, \frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$.

٦- جد معادلة بسيطة لعامل البنية الذرية (F) وقيم $2\theta$ للخطوط الأربعة الاولى من نمط حيود المسحوق المرئية ($F^2 \neq O$) باستخدام الاشعة السينية ($Cuk\alpha$) للبنيتين التاليتين:

أ- خلية رباعية الأضلاع متمركزة القاعدة تحتوي على ذرتين احداثياتهما $\frac{1}{2}\frac{1}{2}O$ و OOO وطول احرفها $c=3\AA$ و $a=2\AA$ .

ب- خلية رباعيه بسيطة تحتوي على ذرة واحدة عند OOO.

٧- بلورة رباعية الاضلاع (tetragonal) تحتوي على اربعة ذرات من نوع واحد في الخلية الاساسية الواحدة، تتموضع عند $\frac{1}{4}\frac{1}{2}0$ و $\frac{1}{4}0\frac{1}{2}$ و $\frac{3}{4}0\frac{1}{2}$ و $\frac{3}{4}\frac{1}{2}0$:

أ- اشتق علاقة بسيطة للعامل ($F^2$).

ب- ماهي شبيكة برافس لهذه البلورة .

جـ- ماهو مقدار ($F^2$) للانعكاسات التالية 100 و 002 و 111و 011 .

# الفصل السادس

# المجهر الضوئي

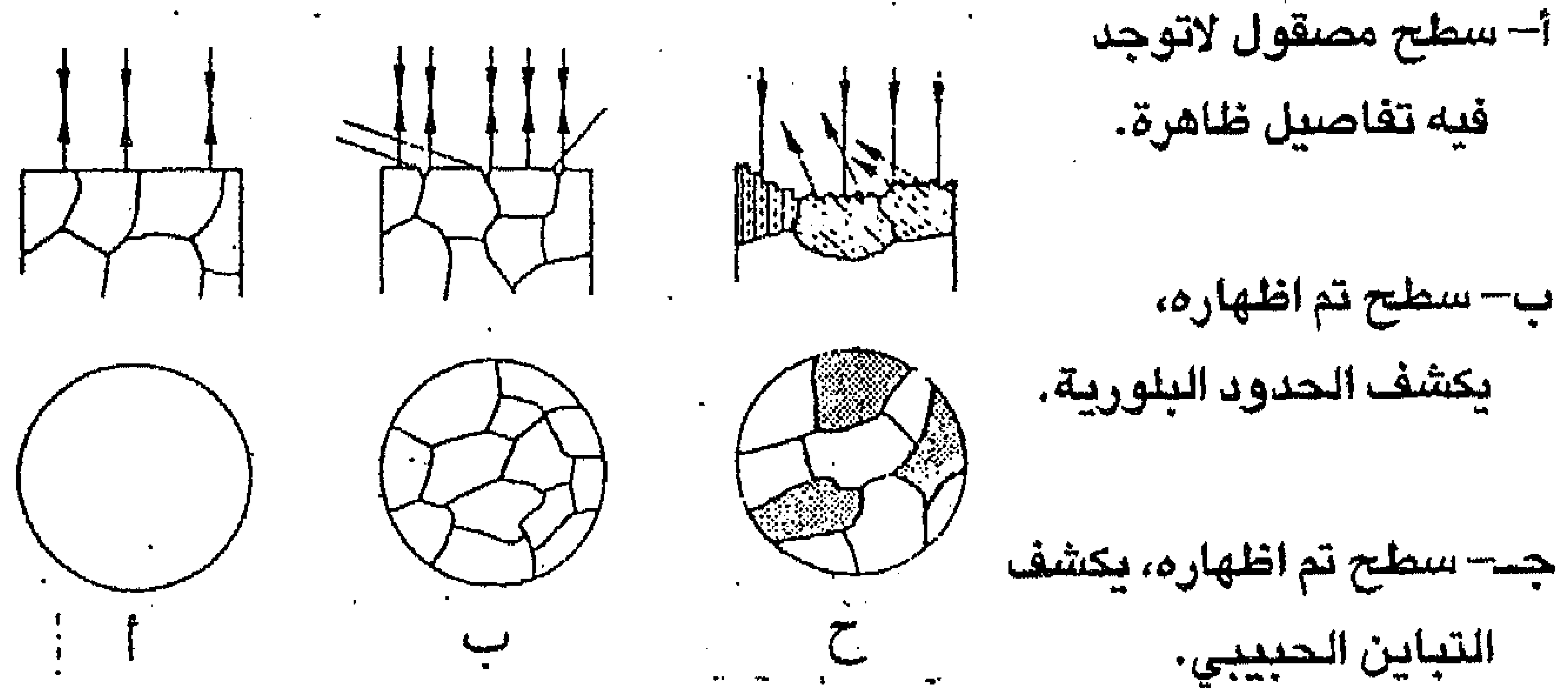
## ٦-١ المقدمة:

لقد مرّ علينا أن الضوء هو موجات كهرومغناطيسية من حيث طبيعته.فهو اذن ينتقل بسهولة في الفراغ وكذلك في الأوساط الشفافة كالهواء والماء ، لكنه يعاني من الانعكاس والانكسار عند انتقاله من وسط الى آخر.يخضع الضوء الى قوانين ثابتة في الانعكاس والانكسار شأنه في ذلك شأن بقية الامواج الاخرى. ان الطول الموجي للضوء المرئي يقع بين 4000Å للضوء البنفسجي و 7000Å للضوء الأحمر. فالضوء الأبيض هو مزيج من سبعة الوان رئيسية هي الوان الطيف الشمسي السبعة المعروفة وهي الاحمر و البرتقالي والاصفر والاخضر والازرق والنيلي والبنفسجي وحسب الطول الموجي ابتداء من الأكبر وصولاً الى الاصغر.

سمي المجهر الضوئي بهذا الاسم لانه يستخدم الضوء في انارة النموذج المراد فحصه.

وحيث ان المعادن، وأغلب المواد ، معتمة (غير شفافة للضوء) وجب لذلك ان يتم فحصها بوساطة الضوء المنعكس عنها كما في الشكل (6-1) بحيث أن مصدر الضوء يجب أن يكون داخل انبوب المجهر نفسه. ويتحقق هذا عادة بوضع عاكس من لوح زجاجي بسيط ورقيق وصغير داخل الانبوب . ولأن من الضروري للضوء الراجع ان يمر خلال العاكس ، فالعاكس يجب ان يصنع من زجاج غير مفضض (أو مفضض جزئياً) . وهذا يعني ان اغلب كمية الضوء المتوفرة سوف تفقد، بالنفاذ خلال الزجاج عندما يسقط الضوء على اللوح وبالإنعكاس عندما يسقط الشعاع الراجع من النموذج على اللوح مرة ثانية. ومع ذلك ، فمصباح صغير ذو 6V يعطي

اضاءة كافية. تتم السيطرة على قطر الشعاع الضوئى بواسطة حاجز الفتحة القزحية (diaphragm) الذي يجب ان يكون مغلقاً جزئياً حتى يكون القطر كافياً ليغطي الجزء الخلفي من العدسة الشيئية فقط. ان الضوء الزائد المنعكس من جانب انبوب المجهر يسبب تشتت الضوء وكنتيجة لذلك يحدث توهجاً في مجال الرؤية، مؤدياً الى فقدان تباين الصورة ودقتها.



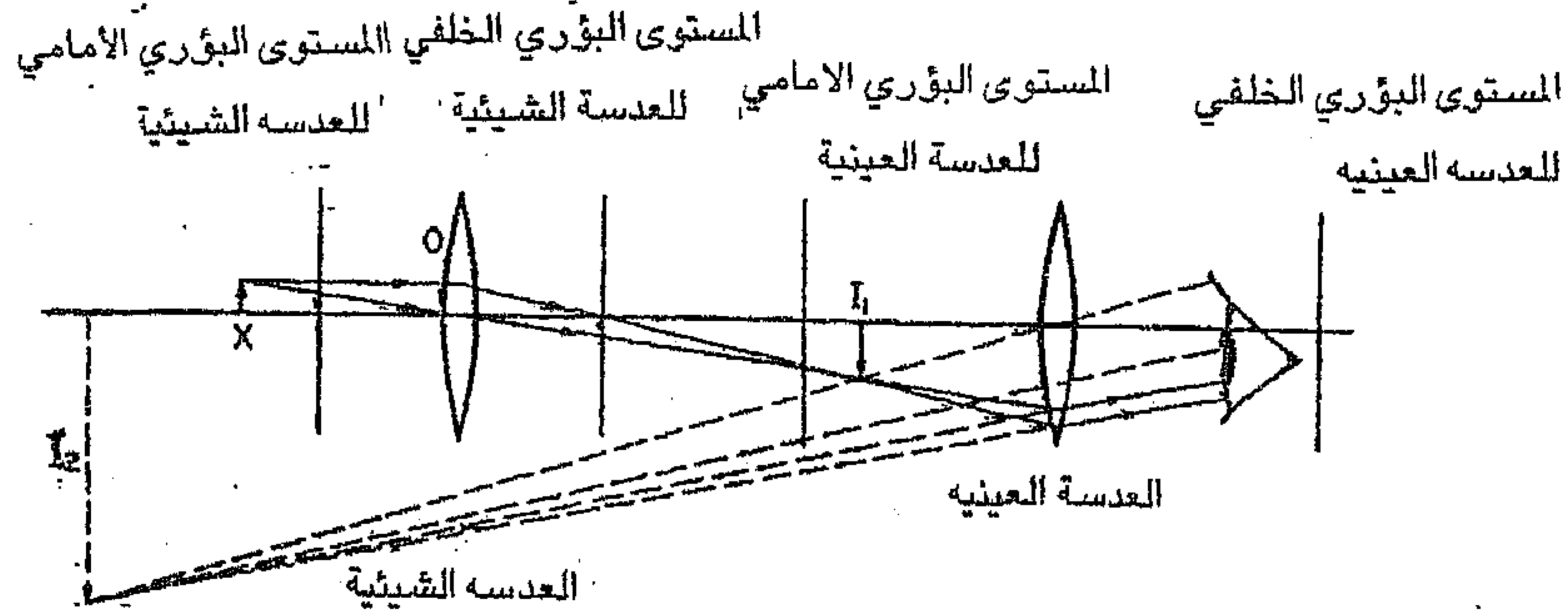

الشكل 6-1 كيفية انعكاس الضوء من سطوح معدن محضّر.

## ٢-٦ أنواع المجهر الضوئي وتركيبه:

يقسم المجهر الضوئى الى نوعين حسب طبيعة عملهما

١- المجهر الضوئى النافذ Transmission Optical Microscope

٢- المجهر الضوئى العاكس Reflected Back Optical Microscope




**الشكل (6-2) مخطط يبين كيفية تكوّن الصورة**

**في المجهر الضوئي المركب.**

يستخدم الأول في حقول علم الاحياء وأحياناً في الجيولوجيا والبوليمر. ويستخدم الثاني، وهو موضوعنا في هذا الفصل، في حقل هندسة المعادن والمواد في الغالب اما من حيث اساس تكوين الصوره في المجهرين فهو نفسه.

يبين الشكل (6-2) رسماً تخطيطياً لمجهر عاكس مركب وكيفية تكوّن الصورة فيه. يتكون هذا المجهر بالأساس من عدستين لامتين تسميان العدسة الشيئية والعدسة العينية. فالشيئية هي اهم هاتين العدستين لانها يجب ان تبين التفاصيل الدقيقة للبنيه المراد فحصها. وهناك عدسات شيئية متوفرة بأبعاد بؤرية هي 2 و 4 و8 و 16 و 32 من المليمترات، حيث يتراوح تكبيرها من حوالي 4 أضعاف الى 95 ضعفاً. وفي حين ان العين المجردة لاتستطيع اظهار مسافات اقل من 0.1mm ،

فالتكبير بوساطة المجهر يجب ان يزودنا بتفاصيل واضحة في الاقل لغاية هذا المقاس (الحد. وبالإضافة الى التكبير ، فقدرة التمييز (Resolving power) مهمة أيضاً. أما الغرض من العدسة العينية فهو لتكبير الصوره المتكونة من قبل العدسة الشيئية. والعدسات العينية مصنعة بحيث تعطي عدد معين من مقادير التكبير (magnification) على سبيل المثال، 5 أضعاف و 10 أضعاف و 15 ضعفاً.

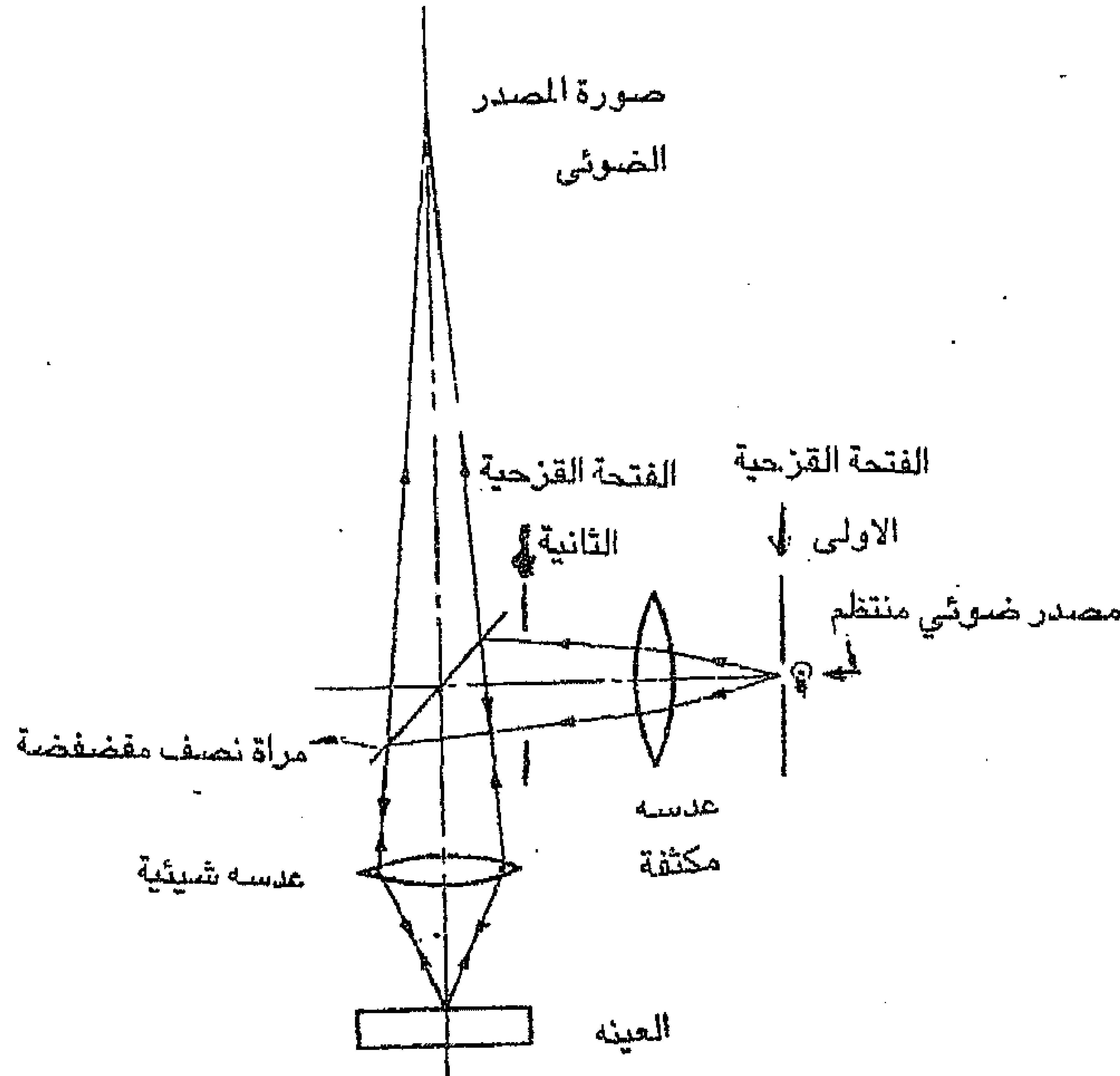
والمسافة الفاصلة بين العدستين الشيئية والعينية تدعى طول انبوب المجهر وهي عادة بحدود 200mm . يمكن ان يحسب مقدار التكبير التقريبي للمجهر الضوئي من العلاقة التالية:

$$\text{التكبير} = \frac{\text{قدرة التكبير للعدسة العينيه} \times \text{طول انبوب المجهر (mm)}}{\text{البعد البؤري للعدسة الشيئية(mm)}}$$

يكون موضع العدسة الشيئية امام الجسم على مسافة اكبر من بعدها البؤري ($f_o$) لكنها أصغر من ($2f_o$) تتكون للجسم صورة مقلوبة ومكبرة في الجهة الثانية من العدسة الشيئية ($I_1$) . تكون المسافة بين العدستين الشيئية والعينية بحيث ان الصوره ($I_1$) تبعد عن العينيه بمسافة اقل من بعدها البؤري ($f_e$)حيث ان $f_e$ يمثل البعد البؤري للعينه.

تكوّن العدسة العينيه صوره خيالية معتدلة مكبرة ($I_2$) للصورة ($I_1$) والاخيرة تعتبر جسماً بالنسبة للعدسة العينية. ان الصورة ($I_2$) هي الصورة النهائية التي ترى من قبل عين الناظر (الفاحص).

يمكن ان تكون إضاءة النموذج مائلة عند كون الشيئية ضعيفة القدرة التكبيرية حيث تكون المسافة بين النموذج والعدسة كبيره نسبياً أو تكون عمودية عند استخدام عدسة شيئية عالية القوة التكبيرية حيث تكون المسافة بين العدسة والنموذج صغيرة. يوضح الشكل (6-3) مخطط مجهر الاضاءة العمودية.



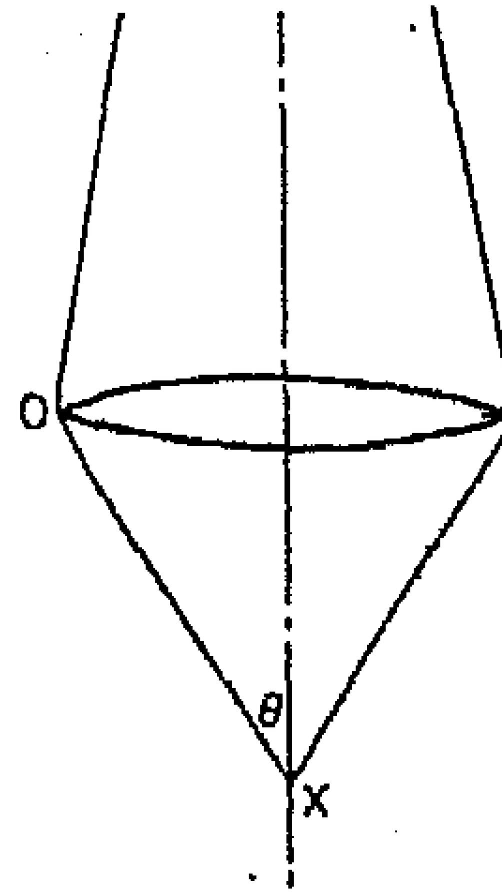

**الشكل (6-3) مخطط لمجهر الاضاءة العمودية.**

يمكن الحصول على أحسن اداء للمجهر عند تحقيق ما يدعى بالإضاءة الحرجة (critical illumination) والتي عندها تصبح تمام فتحة العدسة الشيئية مضاءة وبشكل كامل تماماً لا أكثر وفي الوقت نفسه فإن المصدر الضوئى يبئر (focused) او يتم تركيزه على سطح النموذج.

ذكرنا ان أهم جزء في المجهر هو العدسة الشيئية والوظيفه الرئيسية لها هي جمع أكبر كمية من الضوء القادم من اي جزء من الجسم. ويرمز لمقياس المقدرة على تجميع الضوء بالفتحة العددية (numerical aperture) "N.A." حيث أن :

$$N.A = \mu \sin \theta \qquad .............\ (1\text{-}6)$$

حيث يمثل $\mu$ دليل الانكسار للوسط المقابل للشيئية (بين الجسم والشيئية) و $\theta$ زاوية نصف الفتحة الضوئية، لاحظ الشكل (6-4) .




**الشكل (6-4) العدسة الشيئية (0) تقابل النموذج $\chi$ بزاوية مقدارها$\theta$ .**

ومن الواضح من المعادلة (6-1) انه لو أريد زيادة الفتحة العدديه فيمكن زيادتها بتبديل الهواء بمادة لها دليل انكسار اكبر كزيت الارز او زيادة الزاوية ($\theta$) .

## ٦-٣ قدرة التمييز Resolving Power

تُعرّف قدرة التمييز بأنها المقدرة على كشف تفاصيل البنيه المتقاربة جداً وإظهارها بشكل منفصل واضح. وتكتب رياضياً كالآتي:

$$R.P. = \frac{2\,N.A}{\lambda} \qquad ............(2\text{-}6)$$

تمثل ($\lambda$) الطول الموجي للضوء المستخدم. إن الكمية الاكثر استعمالاً من قدرة التمييز هي حد التمييز ($\delta$) وهي أصغر مسافة بين خطين بحيث يظهران كخطين منفصلين وتساوي رياضياً معكوس قدرة التمييز ، اي:

$$\delta = \frac{I}{R.P} = \frac{\lambda}{2\,N.A} \qquad \text{.............. (3-6)}$$

ومن هنا يتبين ان الفتحة العددية للعدسة الشيئية هي الخاصية الاكثر أهمية وليس قوة التكبير. فمتى تم الوصول الى حد التمييز الادنى للجهاز فلا معنى لزيادة التكبير لانه سوف لن تظهر معالم اضافية عند التكبير الاعلى ، تماماً كما هو الحال عند تكبير الصورة السالبة (الفلم) في جهاز طبع الصورة.

يظهر بوضوح من المعادلة (3-6) ان حد التمييز يتناسب بشكل مباشر مع الطول الموجي للأشعة المستخدمة. فكلما كان الطول الموجي اقصر كلما أمكن رؤية تفاصيل اكثر دقة (تقارباً) في النموذج المفحوص.

مثال: لو فرض ان الضوء المستخدم في اضاءة النموذج هو الاخضر، طوله الموجي ($\lambda$) 500nm و أن قيمة $\theta$ هي 80 ودليل الانكسار ($\mu$) يساوي (1) للهواء.

فيكون مقدار حد التمييز بحدود 250nm اي بمقدار نصف الطول الموجي المستخدم تقريباً ، هذه القيمة النظرية (المحسوبة ) هي أقل بكثير مما يلاحظ عملياً في المجهر الضوئي، فلماذا هذا الاختلاف؟!

الواقع ان سبب الاختلاف هو وجود عيب في العدسات.

## ٤-٦ عيوب العدسات الضوئية (Defects of Optical Lenses)

لايُظهر المجهر الضوئي في الحقيقة صوراً تامة (اي تحاكي النموذج تماماً). لأن العدسات الضوئية تعاني من بعض العيوب اوعدة انواع من الزيغ وهي:

١- الزيغ الكروي . ٢- زيغ الفارزة (Coma) . ٣- اللابؤرية . ٤- تقوس المجال
٥- التشوه . ٦- الزيغ اللوني.

تعيق هذه العيوب استخدام العدسات البسيطة في الاجهزة الضوئية وستناقش هذه العيوب باختصار لبيان امكانية التخلص منها او تقليل قيمها الى مقادير يمكن قبولها.

تم تعريف الزيغ الكروي بأنه الفرق في موضع تبئير الأشعة القادمة من مناطق مختلفة من العدسة الشكل (5-6) (a) . فتكون الأشعة الساقطة قريباً من المحور الأساس للعدسة صورة على المحور عند نقاط ابعد عن العدسة من الصورة التي تكونها الاشعة الساقطة بعيداً عن المحور. يسمى هذا الزيغ بالزيغ الكروي الموجب (Positive spherical aberration). أما اذا كونت الأشعة القريبة من المحور نقطاً بؤرية أقرب مما تكونه الأشعة البعيده عن المحور فيدعى عندئذ بالزيغ الكروي السالب ، يتم اختزال او تقليل الزيغ الكروي، عادة، بوضع حجاب ضوئي (فتحة متغيرة)(diaphragm) امام العدسة بحيث يسمح للأشعة القريبة من المحور الاساسي فقط بالمرور لتكوين الصورة. ان المأخذ الوحيد لهذه الطريقة هو أنها تقلل من شدة اضاءة الصورة لأنه سيفقد بعض الضوء . اما الاختيار الثاني فيتم استخدامه في العدسات الشيئية المغمورة بالزيت (عند تطلب التكبير العالي) وهو أن يوضع الجسم عند النقطة اللازيغيّه (aplanatic point). فتكون الصورة في هذه الحالة خالية من الزيغ الكروي (وزيغ الفارزة ايضاً) من دون الاضطرار الى استعمال الحجاب اي من دون اختزال للإضاءة.

إذا صحح زيغ العدسة الكروي بالنسبة للأجسام الواقعة على المحور الأساس فسيظل هناك زيغاً كروياً بالنسبة للأجسام الواقعة خارج المحور الاساس.

يُعرف هذا العيب بزيغ الفارزه (Coma aberration) كما في الشكل (5-6) (b) حيث يزداد قطر الصورة كلما ابتعدت الاشعة عن المحور الأساس للعدسة. تتألف الصورة الكاملة في هذه الحالة من سلسلة متداخلة من الصور الدائرية ذات الاقطار المتدرجة بازدياد ابتداءً من $I_1$ نحو الخارج. تكون شدة الضوء العظمى عند $I_1$ لتقل

كلما ابتعدنا نحو الخارج . تقل حدة هذه الظاهرة اذا استخدمت فتحة ضوئية لمنع الاشعة المارة في المناطق الخارجية من العدسة. تتصف صورة الجسم النقطي بعيداً عن المحور الاساس بخطين بؤريين مع دائرة ذات أقل تشويه بينهما . يعرف هذا العيب باللابؤريه (astigmatism) كما هو موضح بالشكل (5-6) (c) تكوّن الاشعة المماسه*(tangential rays) OM و `OM الصورة المماسية ($I_T$) وتكوّن الأشعة السهمية (Sagittal rays) الصوره السهمية ($I_s$) . تتكون الصورة الافقية الخطية عند $I_T$ و الصورة الخطية الموضوعة في المستوى المماس بزاوية عموديه على الشعاع الأساس عند $I_S$ .

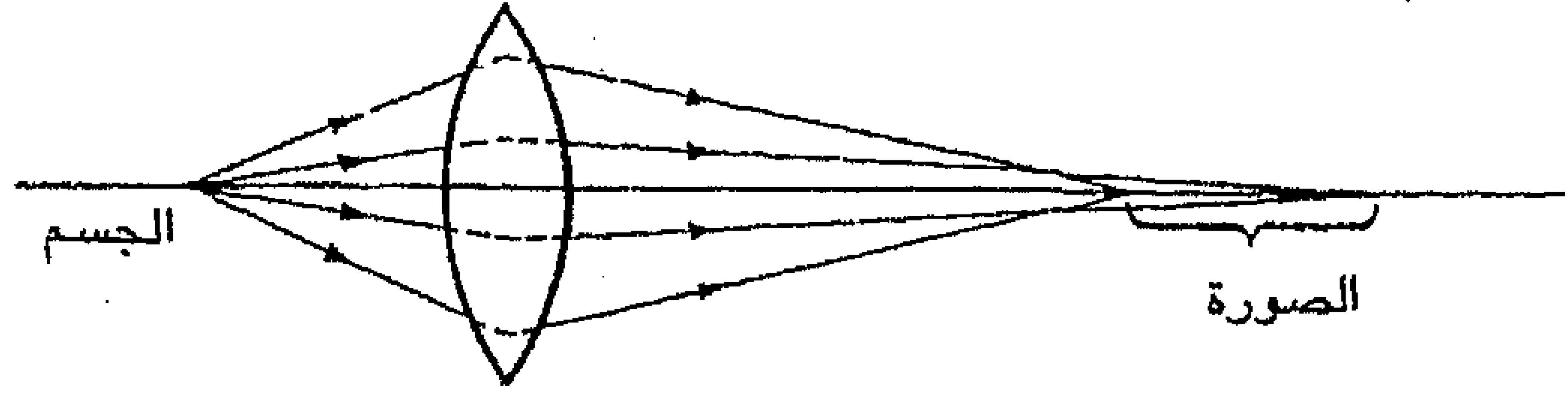
تقع الدائرة الاقل تشويهاً بين الصورتين وعندها يتم الحصول على أحسن صورة ممكنة.

يؤدي العيب المعروف بانحناء المجال (curvature of field) الى تقوس صورة الجسم المستوي. يتكون هذا التقوس بسبب تغير البعد البؤري للعدسة كلما ابتدع الجسم النقطي عن المحور الاساس للعدسة.ويعتمد هذاالعيب نتيجة لذلك على دليل الانكسار ونصفي قطري التكور للعدسة. يمكن التخلص من هذا العيب بالتصميم الدقيق.

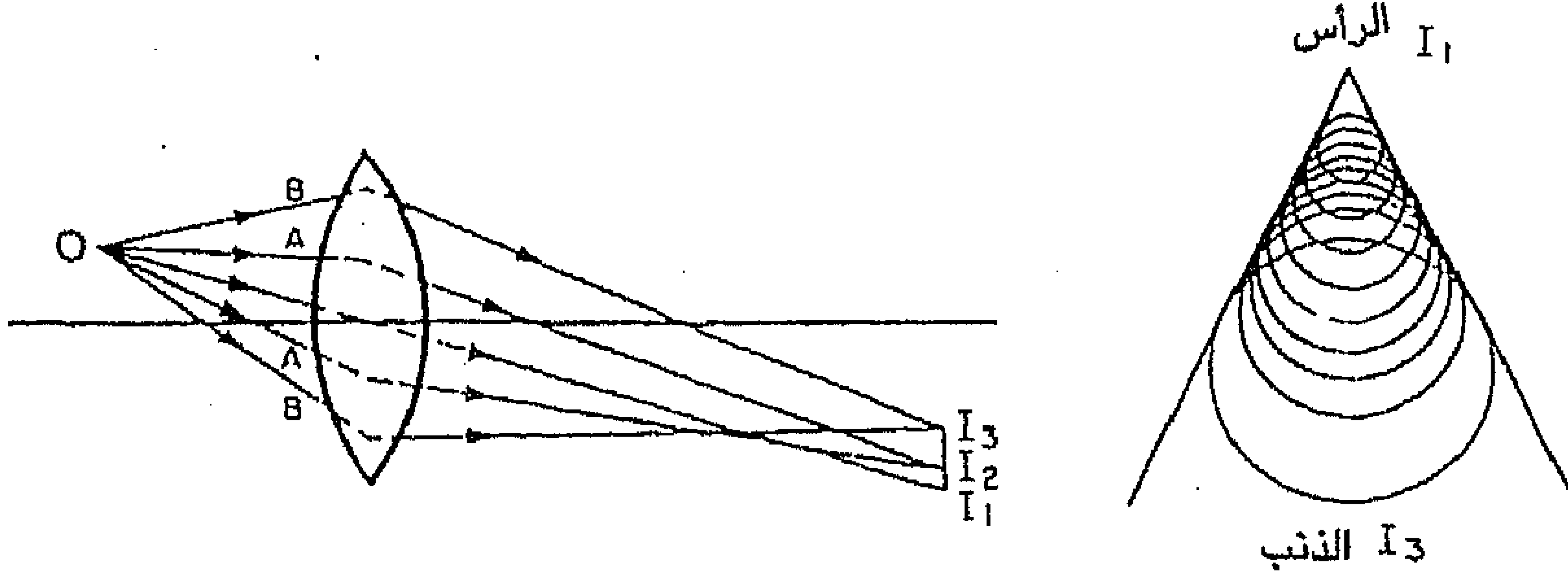
ينشأ هذا التشويه بسبب تغيّر التكبير مع زيادة ابتعاد الجسم عن المحور الضوئى . فإذا قل التكبير بزيادة المسافة عن المحور، فالمناطق الخارجية للصوره ستكون ذات قياس صغير فينتج عن ذلك تشويه البرميل (barrel distortion). اما إذا زاد التكبير كلما زادت المسافة عن المحور الضوئي، فالأجزاء الخارجية للصورة ستكون ذات قياس اكبر لينتج عن ذلك تشويه وسادة الدبابيس (Pin - cushion distortion) كما في الشكل (5-6) (d) .

---

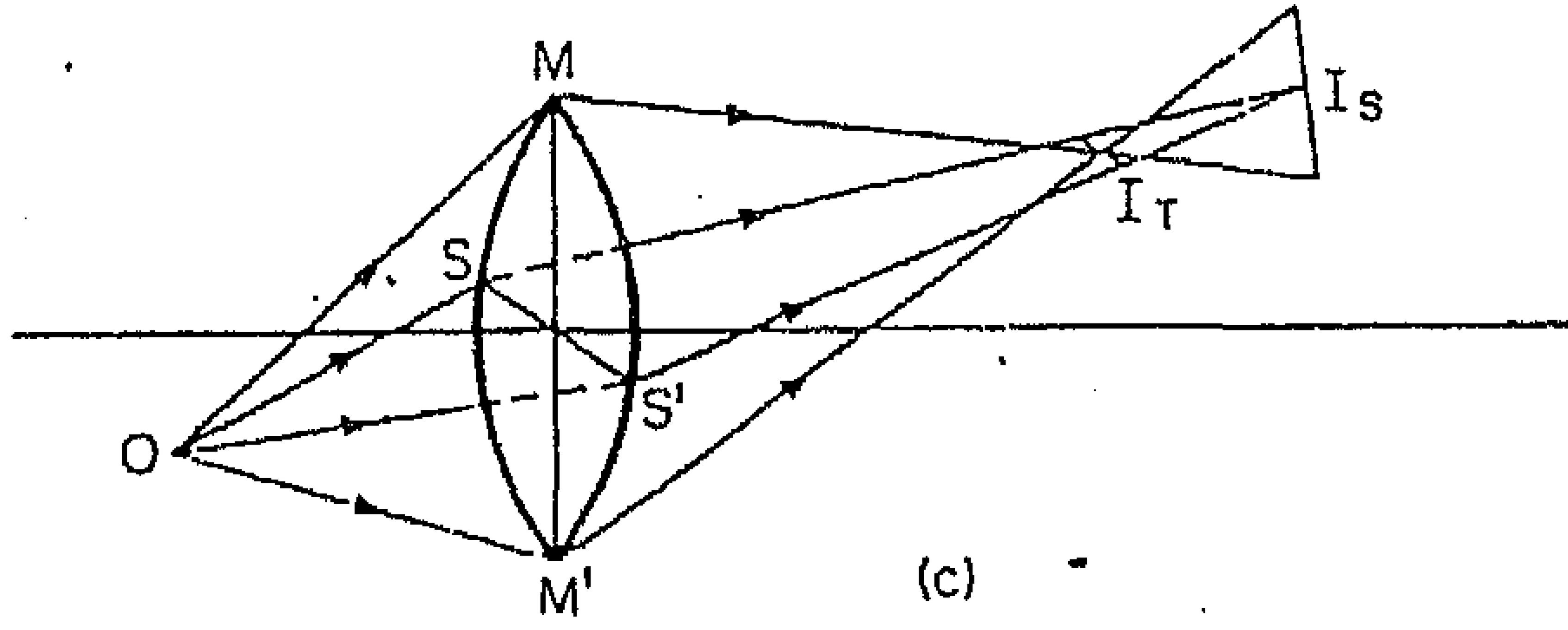
* يحدد القطر العمودي `MM للعدسة والقطر الافقي `SS المستويين المماسي والسهمي على التعاقب.



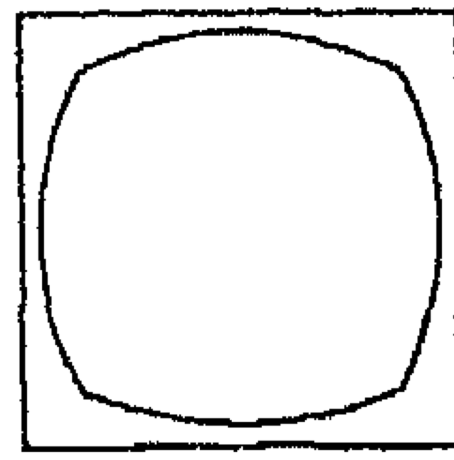

(a)

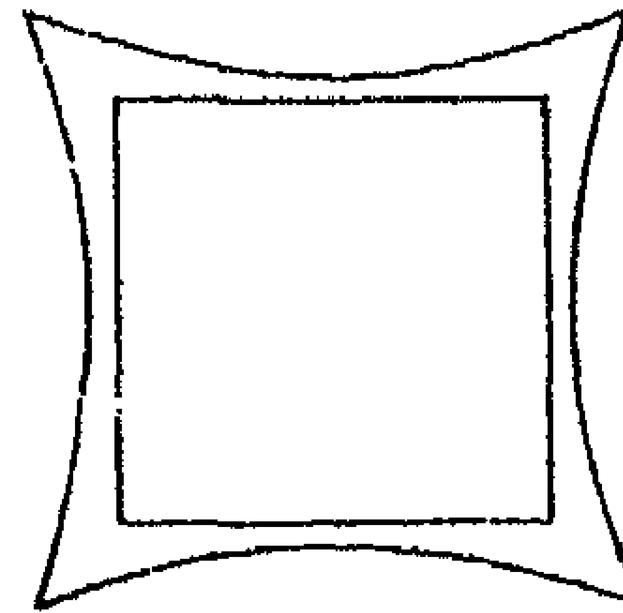



(b)




(c)




(d)

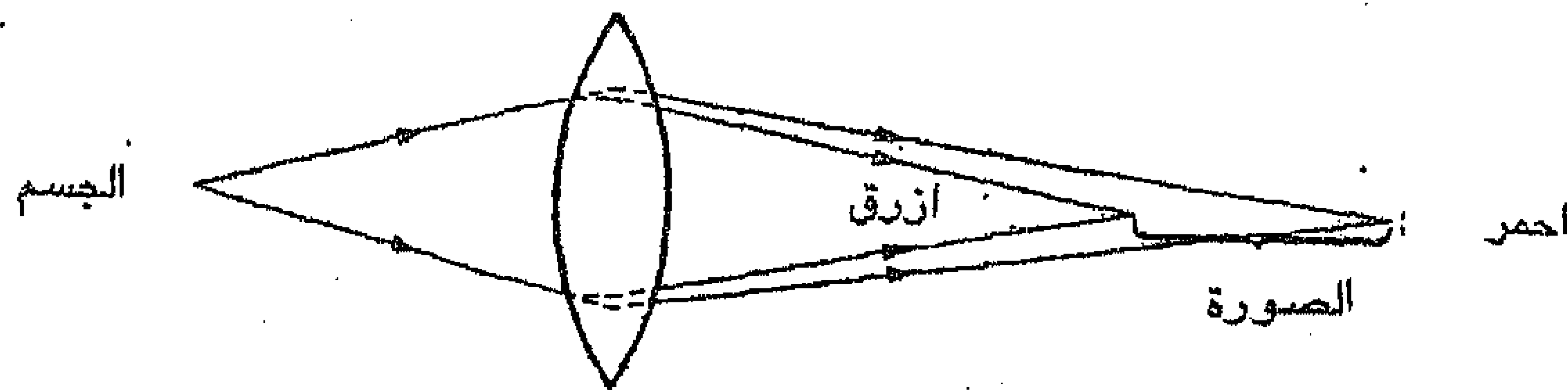
**الشكل (6-5) عيوب العدسات (a) الزيغ الكروي**

**(b) زيغ الفارزة (c) اللابؤرية (d) التشويه.**

يتولد هذا التشويه عند منع الشعاع الاساس القادم من الجسم الواقع خارج المحور من الدخول الى العدسة بوساطة حابس عدسة (lens stop) ولذلك تستخدم حابسات اوسدادات ضوئية متموضعة بصورة ملائمة لمنع حدوث هذا التشويه.

تبدي كل أنواع الزجاج خواص تشتيتيه للضوء اي أن دليل الانكسار غير متساوي للأطوال الموجية المختلفة في الطيف المرئي (الضوئى) . وعليه تكون الصورة المتكونه من الاشعة ذات الطول الموجي الاطو ل ابعد عن العدسة المحدبة من الصورة المتكونة من الاشعة ذات الطول الموجي الا قصر.لذا تظهر صورة الجسم النقطي المضاء بالضوء الابيض كنقطة زرقاء محاطه بحلقة حمراء كما في الشكل (6-6) . تدعى هذه الظاهرة بالزيغ اللوني (chromatic aberration) .

يمكن ازالة هذا الزيغ بضم عدسة مقعرة ضعيفة من زجاج الصوان (flint glass) الى العدسة المحدبة الرئيسية (المكونة للصورة) المصنوعة من زجاج التاج (Crown glass) مكوّنة بذلك مزدوج لا لوني (achromatic couple) .




**الشكل (6-6) مخطط للأشعة يوضح الزيغ اللوني.**

## ٥-٦ طرائق زيادة قدرة التمييز:

تعتمد الفتحة العددية ومن ثم قدرة التمييز للعدسة الشيئية على التصميم الهندسي الضوئي للمجهر ($N.A=\mu \sin \theta$) . فيكون المتغيران الوحيدان هما دليل الانكسار للوسط المقابل للعدسة الشيئية والطول الموجي للضوء المستخدم . يمكن الحصول على اعظم فتحة عدديه، تحت الظروف المختبرية الاعتيادية، عند غمر العدسة الشيئية بزيت (دليل انكساره"$\mu$" بحدود 1.3) مع استخدام الضوء الأخضر (طوله الموجي حوالي 5000Å) فيكون حدا لتمييز ($\delta$) المحسوب نظرياً بحدود 0.2µm ،لكنه من الناحية التجريبية،يكون هذا الحد مساوياً 1µm على وجه التقريب وذلك بسبب العيوب الموجودة في العدسات.لايمكن استخدام زيت دليل انكساره اكبر من 1.3 وذلك لعدم ملائمة شفافيته الضوئية. ويبقى نتيجة لذلك متغير واحد فقط هو الذي يتحكم بقدرة وحد التمييز وهو الطول الموجي للضوء المستخدم ($\lambda$) .

يمكن استخدام الضوء فوق البنفسجي (طوله الموجي حوالي 2000A) وذلك لتقليل حد التمييز الى حوالي نصف قيمته في حالة استخدام الضوء الاخضر.يعني هذا انه يمكن عند استخدام الاشعة فوق البنفسجية، الوصول الى الغاية الصغرى لحد التمييز عند المقارنة مع قيمته عند استخدام الضوء الاخضر. لكنه مما لاشك فيه ان هناك صعوبات عملية عند استخدام الاشعة فوق البنفسجية في اضاءة العينه، لأن زجاج العدسة الشيئية الاعتيادية يمتص بشدة هذه الاشعة . لذا يجب استخدام عدسة شيئية مصنوعة من الكوارتز (Quartz) او الفلوريت (fluorite).

ومن هنا يتبين ان هناك حاجة ماسة لتقليل حد التمييز وذلك باستخدام اشعة ذات طول موجي قصير جداً.امكن الحصول فيما بعد على هذه الاشعة وهي الاشعة السينية والامواج المصاحبة للإلكترونات المعجلة. أما الاشعة السينية فلايمكن استخدامها كمصدر اضاءة في المجهر لان العدسات الضوئية (الزجاجية) ليست لها

المقدرة على لم او تجميع هذه الاشعة ومن ثم عدم تكوين الصورة كما أن الالكترونات لايمكن استخدامها لانها لايمكنها اختراق العدسات الزجاجية اولاً ولايمكن للعدسة الزجاجية تجميعها ثانياً.

لقد تم فيما بعد استخدام الالكترونات المعجلة في المجهر الإلكتروني لتكوين صوره للجسم المفحوص حيث امكن زيادة قدرة التمييز فيه الى حد كبير جداً وذلك لان الطول الموجي للإلكترونات المعجلة صغير جداً ويعتمد على مقدار الفولتيه المعجلة كما سنرى في الفصل القادم. فعلى سبيل المثال فإن الطول الموجي للإلكترونات المعجلة بفرق جهد مقداره (100000V) هو 0.037Å فقط مقارنة بالطول الموجي للضوء الاخضر، آنف الذكر، 5000Å ومن ذلك يمكن تصور مقدار التحسن في قدرة التمييز للمجهر الالكتروني .

## ٦-٦ استخدام المرشحات في الفحص والتصوير بالمجهر الضوئي:

قد يكون من المفيد استخدام جزء قليل فقط من طيف الاطوال الموجية الموجودة في الضوء الابيض، وفي مثل هذه الحالات تستعمل المرشحات (filters) لإزالة الأطوال الموجية غير المطلوبة. وهذا يمكن ان يزيد التباين وتحديد معالم الصوره الضوئية بسبب الانخفاض في الزيغ اللوني. فاستعمال المرشح الملائم يمكن ان يحسن قدرة التمييز للعدسة الشيئية ايضاً.

ان المصادر الضو ئية المستخدمة في التصوير المجهري تشع بعضاً من الاشعة تحت الحمراء (infra red) والاشعة فوق البنفسجية (ultra-violet) ايضاً وكل منهما يسبب تأثيرات غير مرغوبة. يمكن ازالة الضوء فوق البنفسجي بامرار حزمة الاضاءة خلال خلية زجاجية فيها محلول مائي كثافة نترات الصوديوم فيه 2% . وتزيل خلية السائل أيضاً الحرارة الناتجة من الاشعة تحت الحمراء،وبهذا يمكن تجنب اي تشويه للصوره قد ينشأ من جراء ذلك.

ولأجل زيادة التباين بين الاجزاء المختلفة في البنية المجهرية، يجب ان يكون لون

زجاج المرشح متمماً للون السائد في البنيه المزمع تصويرها. وغالباً ما يستعمل مرشح اصفر في تصوير بنية النماذج الحديدية.

ولابد من زيادة زمن التعريض عند استعمال المرشحات لان قسماً من الضوء يمتص من قبل المرشح نفسه وبذلك تقل شدته.

# تمارين الفصل السادس

١- عرّف الاصطلاحات التالية: ١- قدرة التمييز . ٢- الزيغ اللوني. ٣- الزيغ الكروي . ٤- حد التمييز .

٢- مجهر له طول انبوب مقداره (200mm) . احسب التكبير التقريبي الحاصل عندما يتم استخدام عدسه شيئية بعدها البؤري (4mm) مع عدسه عينيه ذات تكبير مقداره (8) أضعاف.

٣- قارن بين قدرة التمييز للمجهر الضوئي عند استخدام الضوء الاخضر ($\lambda$=5000Å) في الاضاءة والمجهر الالكتروني عندما تكون الفولتيه المعجلة 100kV($\lambda$=0.037Å) وعند تساوي بقية العوامل.

٤- ارسم مخطط لكيفية تكوّن الصوره في المجهر الضوئي المركب مع شرح عمل كل من العدسة الشيئية والعينية.

٥- عدد أنواع العيوب في العدسات الضوئية ثم اشرح واحداً منها واذكر كيفية التقليل من تأثيرها.

٦- لماذا يكون حد التمييز المحسوب اصغر بكثير من حد التمييز المقاس عملياً؟ أذكر كيف يمكن تقليله عملياً.

٧- ماهي الغاية من استخدام المرشحات عند الفحص المجهري وكيف يمكن التخلص من الاشعة فوق البنفسجية او تحت الحمراء.

# الفصل السابع

# المجهر الالكتروني

## ٧-١ الخواص الاساسية للإلكترونات:

من الضروري معرفة بعض الخواص الأساسية للإلكترونات مع ما صاحب ذلك من تطويرات في نظرية الالكترون قبل الدخول الى المجهر الالكتروني. اضافة الى ذلك من الضروري معرفة بعض خواص الالكترونات الموجوده في الذرات والمواد الصلبة. ويمكن القول ان الالكترون يمثل الماهية الاكثر أهمية في الكون.

هناك حقيقتان تلازمان الالكترون هما أولاً انه جسيم (دقيقة) مشحون بشحنة سالبة وله كتلة معينه ثانياً أنه يمتلك طبيعه موجبه وبذلك يشترك بهذه الخاصية مع الضوء والأشعة السينية او اية أشعة كهرومغناطيسية أخرى. ان هذه الخاصية الازدواجية (الدقائقية الموجبة) هي التي جعلت الالكترون ملائم بصوره خاصة لدراسة بنية وتكوين المادة في جهاز ضوئي الكتروني.

يعالج الميكانيك الكمي (Quantum mechanics) بالأساس فكرة الدقائقية الموجية كما في معادلة شرودنكر (Schrodingr`s equatin) وفكرة الامواج المادية لدبرولي (de Broglie) وقاعدة عدم التأكد (uncertainty principle) لها يزنبرك (Hei-senberg) ثم الاسهامات المتعلقة بذلك والتي تم تطويرها بعد سنة 1910 .

## ٧-٢ الطبيعة الموجية للإلكترونات:

لقد تأكدت الطبيعة الموجية للإلكترونات نتيجة لبحوث عدد من العلماء كان آخرهم دبرولي سنه 1924 في اطروحته لنيل شهادة الدكتوراه حيث وضع الفكرة في معادلة مهمة جداً وهي:

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad \text{..............} \ (1\text{-}7)$$

حيث تمثل $\lambda$ الطول الموجي المرافق.

و h ثابت بلانك (6.626x10$^{-34}$J.sec)(Planck`s constant)

وp زخم الجسيم.

أي أن

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad \text{.................. (2-7)}$$

v سرعة الجسيم و m كتلته الحركية .

يمكن كتابة المعادلة (2-7) كالآتي:

$$\lambda = \frac{h}{m_o v}\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad \text{......................(3-7)}$$

باعتبار أنه حسب النظرية النسبية

$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad \text{.............(4-7)}$$

تمثل $m_o$ كتلة السكون للجسيم

و c سرعة الضوء>>v سرعة الجسيم ($c = 3x10^{8}\ m.s^{-1}$) يستنتج من نظرية دبرولي وأبحاث بقية العلماء انه اذا مرّت حزمة من الالكترونات خلال بلورة، فإنها يجب ان تظهر ظاهرتي الحيود والتداخل (interference) مشابهة في ذلك الأشعة السينية. لقد تم الاعلان في سنة 1927 انه تم التأكد تجريبياً على حيود الالكترونات. وبذلك تم التحقق من الخاصية الموجية للإلكترونات إضافة الى الخاصية الكتلية كجسيمات. يمكن كتابة طاقة الالكترونات المعجلة بفرق جهد مقداره $V_o$ كالآتي وحسب النظرية النسبية ايضاً:

$$eV_o = mc^2 - m_o c^2 \quad \text{.................. (5-7)}$$

تمثل $V_o$ الفولتيه المعجلة بالفولت و

e شحنة الالكترون (1.6 x10$^{-19}$ coulomb) و

$m_o$ كتلة السكون للإلكترون (9.11x10$^{-31}$ kg).

يمكن الآن استخراج العلاقه بين الطول الموجي المصاحب للإلكترونات وبين الفولتيه المعجلة من المعادلتين (7-3) و (7-5) .

$$\frac{h}{\lambda} = \sqrt{2m_0eV_0 + \frac{e^2V_0^2}{c^2}} \quad \text{................ (6-7)}$$

وبتعويض قيم الثوابت الموجودة في المعادلة (7-6) يمكن حساب قيمة الطول الموجي المصاحب للإلكترونات ($\lambda_e$) بالإنكستروم($\mathring{A}$) .

$$\lambda_e = \frac{12.27}{\sqrt{V_0\,(1+0.978\text{x}10^{-6}\,V_0)}} \quad \text{........ (7-7)}$$

والمعادلة الاخيرة هي العلاقة المضبوطة لاية سرعة تمتلكها الالكترونات. ويمكن استخدام العلاقات التقليدية (classic)للطاقة والتي تصلح لحساب الطول الموجي للإلكترونات عند امتلاكها سرعاً قليله نسبياً اي عند فرق جهد كهربائى منخفض حيث يمكن كتابة معادلة الطاقة الحركية كالآتي:

$$eV_0 = \frac{1}{2}\,mv^2 \quad \text{............. (8-7)}$$

ومن المعادلتين (7-2) و (7-8) وبعد تعويض قيم الثوابت كما في الحالة السابقة ينتج ان $\lambda_e$ ($\mathring{A}$) هي:

$$\lambda_e = \frac{12.27}{\sqrt{V_0}} \quad \text{..................(9-7)}$$

اما حدود الفولتيه المعجلة في هذه الحالة فهي 100kV, اي انه يمكن استعمال هذه العلاقة المبسطة لفولتيات تعجيل اقل من 100kV على وجه التقريب. لأنه سيكون هناك عامل تصحيح مقداره 5% في الطول الموجي عند هذا التعجيل وفي هذه الحالة يفترض استخدام العلاقة (7-7) لحساب الطول الموجي. يبين الجدول (7-1) تأثير زيادة الفولتيه المعجلة على الطول الموجي للحزمة الإلكترونية.

جدول (7-1) تغير الطول الموجي للإلكترونات مع الفولتيه المعجلة :

| $V_o$ فرق جهد التعجيل (فولت) | $\lambda_e$ الطول الموجي للحزمة الالكترونية (Å) |
|---|---|
| 1 | 12.27 |
| 100 | 1.227 |
| 1000 | 0.3880 |
| 10000 | 0.1227 |
| 50000 | 0.0548 |
| 70000 | 0.0449 |
| 80000 | 0.04338 |
| 90000 | 0.0392 |
| 100000 | 0.0370 |
| 150000 | 0.0296 |
| 1000000 | 0.0087 |
| 2000000 | 0.0050 |

## ٣-٧ طرائـق انبعاث الالكترونات:

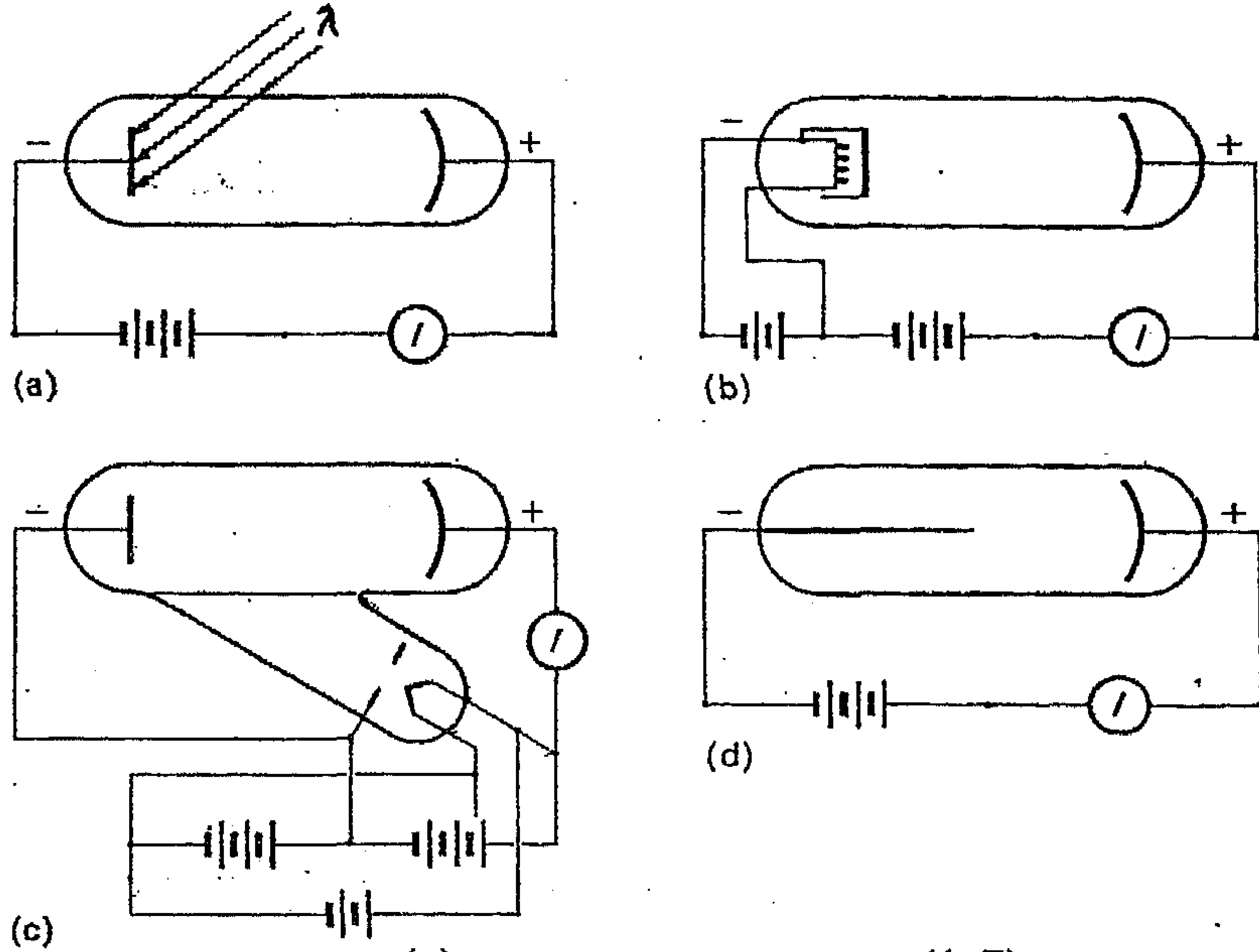
يمكن النظر الى المعدن بأنه أيونات لذرات ذلك المعدن سابحة في بحر من الالكترونات الحرة او الكترونات التكافؤ . يوجد حاجز طاقة (energy barrier) في كل معدن يعتمد على دالة الشغل (work function) الخاصة به والجدول (7-2) يتضمن قيم دالة الشغل لبعض المعادن.

جدول (7-2) معدل دالة الشغل لبعض المعادن

| رمز المعدن | (eV) $E_W$ | رمز المعدن | (eV) $E_W$ |
|---|---|---|---|
| Ba | 2.49 | Nb | 4.04 |
| Cs | 1.81 | Pd | 5:00 |
| Cr | 4.60 | Pt | 5.35 |
| Co | 4.41 | Re | 5.10 |
| Cu | 5.30 | Rh | 4.58 |
| Hf | 3.53 | Ag | 4.78 |
| $\alpha$-Fe | 4.48 | Ta | 4.19 |
| Mg | 3.60 | Th | 3.35 |
| Mo | 4.25 | W | 4.50 |
| Ni | 4.61 | Zr | 4.50 |

وإذا أريد لاحد الالكترونات الحرة ان يخرج من سطح المعدن فيلزمه الحصول على طاقة تكفي لعبور هذا الحاجز. ان عملية حصول الالكترونات الحرة في المعدن على طاقة هي التي تؤدي الى انبعاث الالكترونات.

يبين الشكل (7-1) تخطيطاً للطرائق الأساسية لانبعاث الالكترونات. يلاحظ ان طاقة الكترونات الجسم الصلب تزداد عند تسخينه ، حيث تولد الذبذبات المتزايده لقلب الايونات زيادة في تصادمات الالكترونات والتي تؤدي الى زيادة الطاقة الحركية للإلكترونات ويمكن تحقيق ذلك بعدة أساليب أخرى :




**الشكل (7-1) أساليب انبعاث الالكترونات (a) الانبعاث الضوئي (b) الانبعاث الحراري (c) الانبعاث الثانوي (d) انبعاث المجال.**

١- بامتصاص الفوتونات الضوئية القريبة من سطح المعدن ذات الطاقة hυ (h ثابت بلانك وυ التردد).

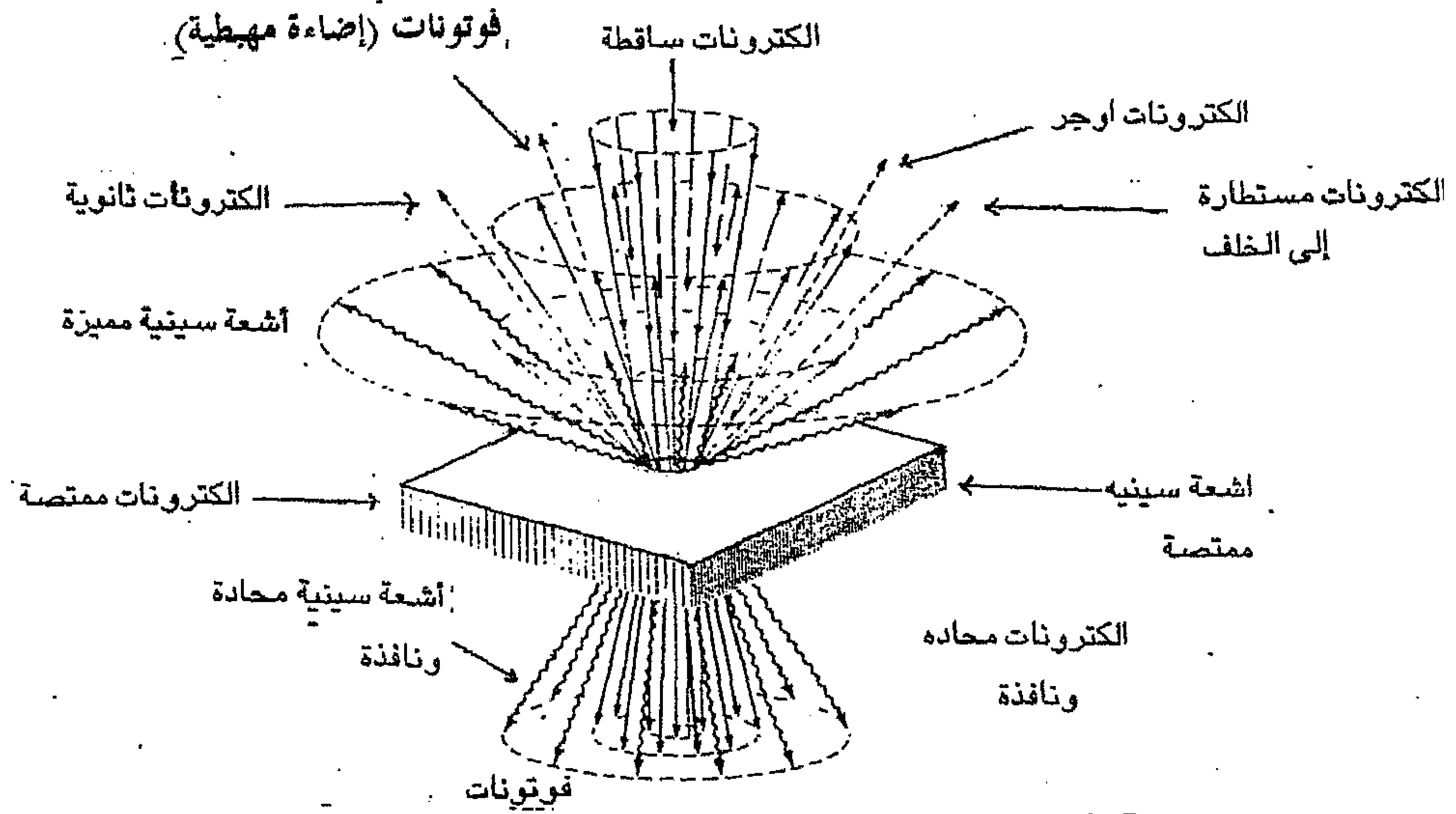
٢- بقصف سطح المعدن بالكترونات اوليه عالية الطاقة والتي بدورها تعطي طاقة اضافية الى الالكترونات القريبة من السطح حيث تعينها على الهروب منه.

٣- خفض او اخماد ارتفاع حاجز الطاقة بتأثير المجال الكهربائي المستقر (electro static field). يبين الشكل (7-1) بحالاته الاربعه (a و b و c و d) الانبعاث الالكتروني ضوئياً والانبعاث الالكتروني حرارياً ثم الانبعاث الالكتروني الثانوي وأخيراً الانبعاث الالكتروني بالمجال الكهربائي المستقر على التعاقب. يمكن تصوّر حاجز جهد سطح المعدن كسد يحجز بحر الالكترونات فلأخراج

الاكترونات عبر هذا السد يلزمنا آلية معينه لضخ الالكترونات عبر هذا السد كما في الحالات a و b و c . أما في الحالة d فإن مستوى السد ينخفض بتأثير المجال الكهربائي وبذلك يمكن للإلكترونات ان تشق طريقها عبر السد عند نفس منسوب بحر الالكترونات.

## ٤-٧ التفاعل بين الحزمة الالكترونية والمادة الصلبة:

تحدث عمليات عده اذا سقطت حزمة الكترونية على جسم صلب . ومن هنا برزت عدة تقنيات لدراسة المادة بناء على نوع الظاهرة التي تحدث، يبين الشكل (2-7) أهم نواتج التفاعل بين الالكترونات الساقطة وجسم صلب بلوري. فالأشعة السينية المميزه المنبعثة يمكن ان يتم تحليلها لتزودنا بالتكوين الكيماوي للمنطقة التي انبعثت منها. أما الالكترونات المستطارة عكسياً(back scattered electrons) والإلكترونات الممتصة والالكترونات الثانوية (Secondary electrons) المنبعثة (وهي الكترونات موجوده أساساً في الجسم الصلب والتي طردت منه نتيجة لاصطدام الالكترونات الاولية به) فيمكن ان ترصد وتستخدم في تحاليل تكوين سطح وشحنة وتضاريس(topography) النموذج او الجسم الصلب. يمكن ملاحظة تألق بعض النماذج نتيجة لتولد فوتونات ضوئية في منطقة الاصطدام. يمكن استخدام الالكترونات المحاده في التحليل البلوري والتكوين الكيماوي للجسم كما يمكن استخدامها في الحصول على صورة المجا ل المظلم للنموذج (dark field image) كما سيأتي ذكره . أما الاشعة السينية المحادة فيمكن استخدامها في معرفة الاطوار الموجودة في منطقة التفاعل . أضف الى ذلك امكانية استخدام الالكترونات النافذة لتكون صورة المجال المضيء (bright field image) للنموذج ومعرفة بنيته المجهرية الدقيقة.




الشكل (7-2) التفاعل بين الحزمة الالكترونية الساقطة والجسم الصلب.

## ٧-٥ المجهر الإلكتروني Electron Microscope :

### ٧-٥-١ المقدمة:

كان الإنسان ولايزال شديد التطلع الى معرفة دقائق الاشياء فولدت رغبته هذه في الغوص في اعماق الكون الى مكتشفات علمية هامة أثمرت عن بناء الاقمار الإصطناعية ومركبات الفضاء الاخرى، كما أثمرت محاولاته للتعرف على ماهية المادة ومكوناتها الدقيقة عن بناء المجاهر الضوئية والالكترونية نظراً لما تتمتع به الاخيرة من قدرة تمييز عالية جداً مقارنة بالمجاهر الضوئية. سمي المجهر الالكتروني بهذا الاسم لانه يتم استخدام حزمة الكترونية فيه لتكوين صورة للنموذج . تعددت انواع المجاهر الالكترونية بتعدد الاهداف المطلوب دراستها. فتم تصنيع المجهر الالكتروني النافذ TEM (Transmission Electron Microscope) والمجهر الالكتروني الماسح SEM(Scanning Electron Microscope) و المحلل الإلكتروني الدقيق EPMA (Ecectron probe Micoanalyser) وغيرها من أنواع المجاهر الالكترونية الاخرى.

## ٢-٥-٧ العدسات الالكترونية Electron Lenses

ان الغاية من استعمال نظام العدسات هي جعل قطر حزمة الالكترونات اصغر ما يمكن اي بعبارة أخرى لتكوين صورة مصغرة جداً للمهبط (cathode).

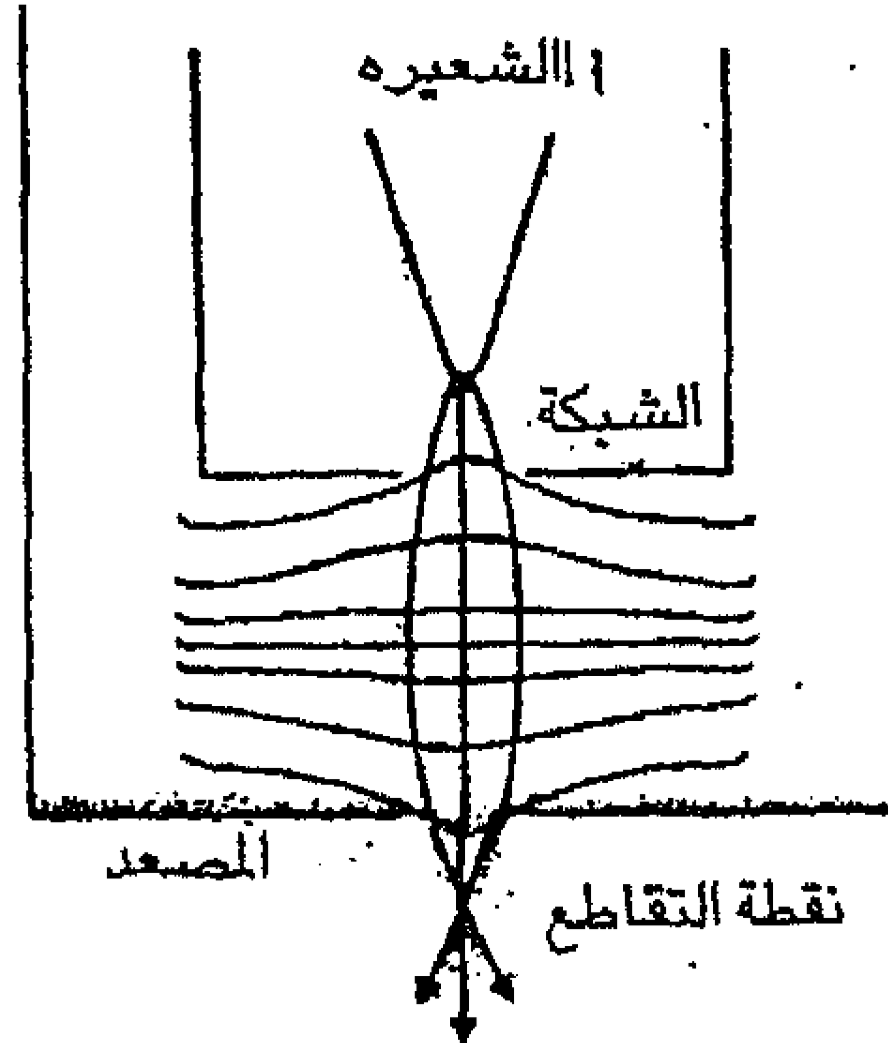
فمن الممكن استخدام عدسات الكهربائية المستقرة (Static Electrical Lens)، كما في حالة قاذف الالكترونات تتألف هذه العدسات في الأساس من مجموعة صفائح تحتوي على ثقوب ليمكن ان تمر من خلالها الالكترونات. تتم المحافظة على فرق جهد ثابت بين كل صفيحتين والتي تمثل عدسة كهربائية مستقر، الشكل (3-7). يعمل انحناء المجال الكهربائي على تبئير الحزمة الالكترونية. يكون استخدام مثل هذه العدسات شاق او فيه شيء من الصعوبة نظراً لأنها تتطلب عزلاً كهربائياً جيد ضد الجهد الكهربائي العالي المطلوب. تعاني مثل هذه العدسات من زيغ كبير ايضاً، ولذا تستخدم العدسات الكهرومغناطيسية (electro magnetic lens) في المجاهر الحديثة في كل المراحل التي تلي مرحلة القاذف الالكتروني.

يمكن التعبير عن القوة التي يؤثر بها المجال المغناطيسي على جسيم مشحون يسير خلاله بالمعادلة الاتجاهية الآتية:

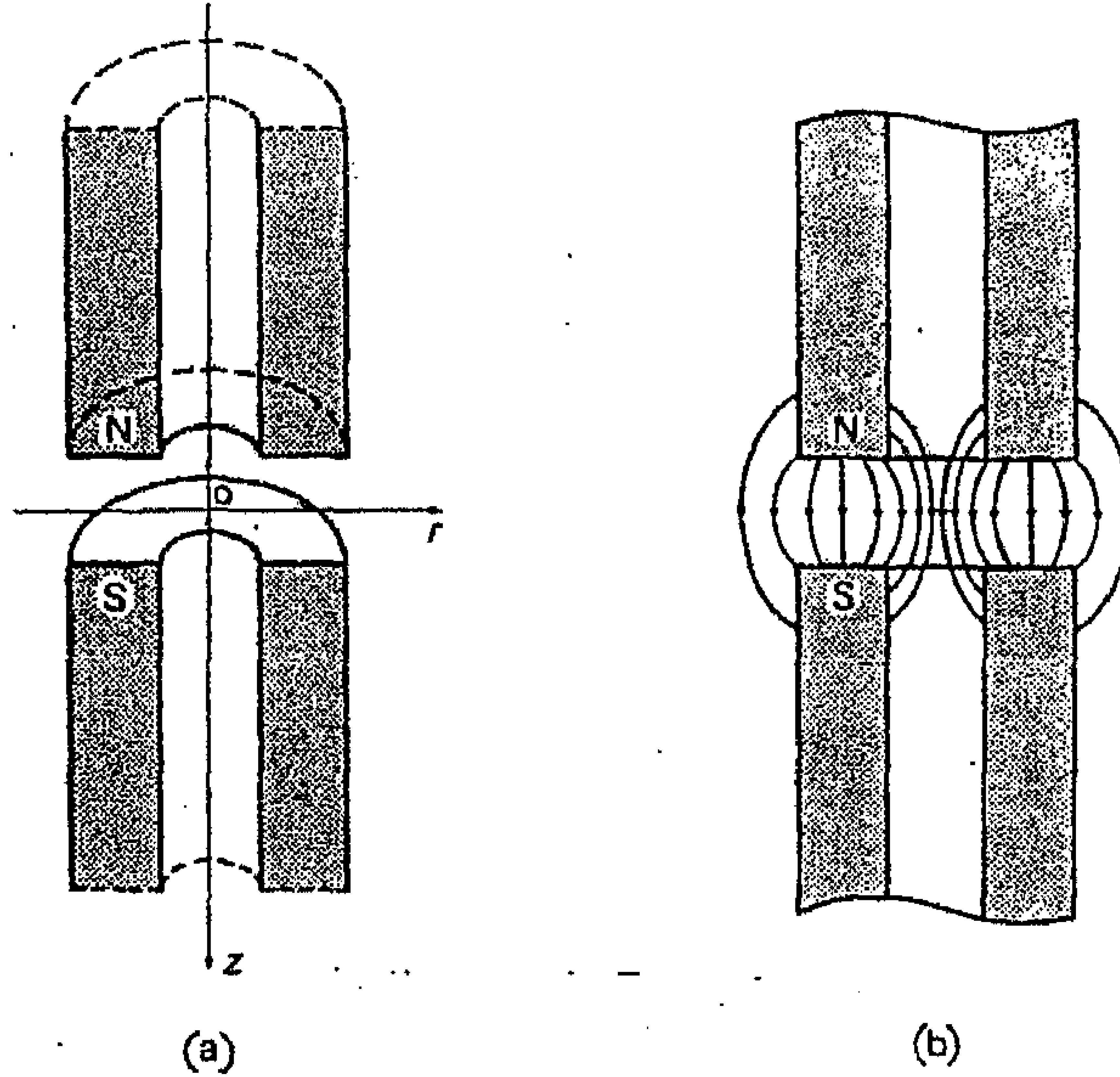
$$F = qv \times B \qquad \text{.............} \ (10\text{-}7)$$

حيث تمثل F القوة و q شحنة الجسيم المتحرك و v سرعته و B الحث المغناطيسي.

يكون اتجاه القوة اذن عمودياً على متجهي كل من الحث المغناطيسي وسرعة الجسيم المشحون، فيجب في العدسة استخدام مجالات مغناطيسية لها مركبات عمودية على اتجاه سرعة الجسيم. أضف الى ذلك يجب ان يكون المجال المستخدم في العدسة متناظراً محورياً. يفي اي ملف بسيط يمر به تيار بهذه الشروط حيث يستخدم هذا النوع من العدسات في أنابيب أشعة المهبط(Cathode ray tube).

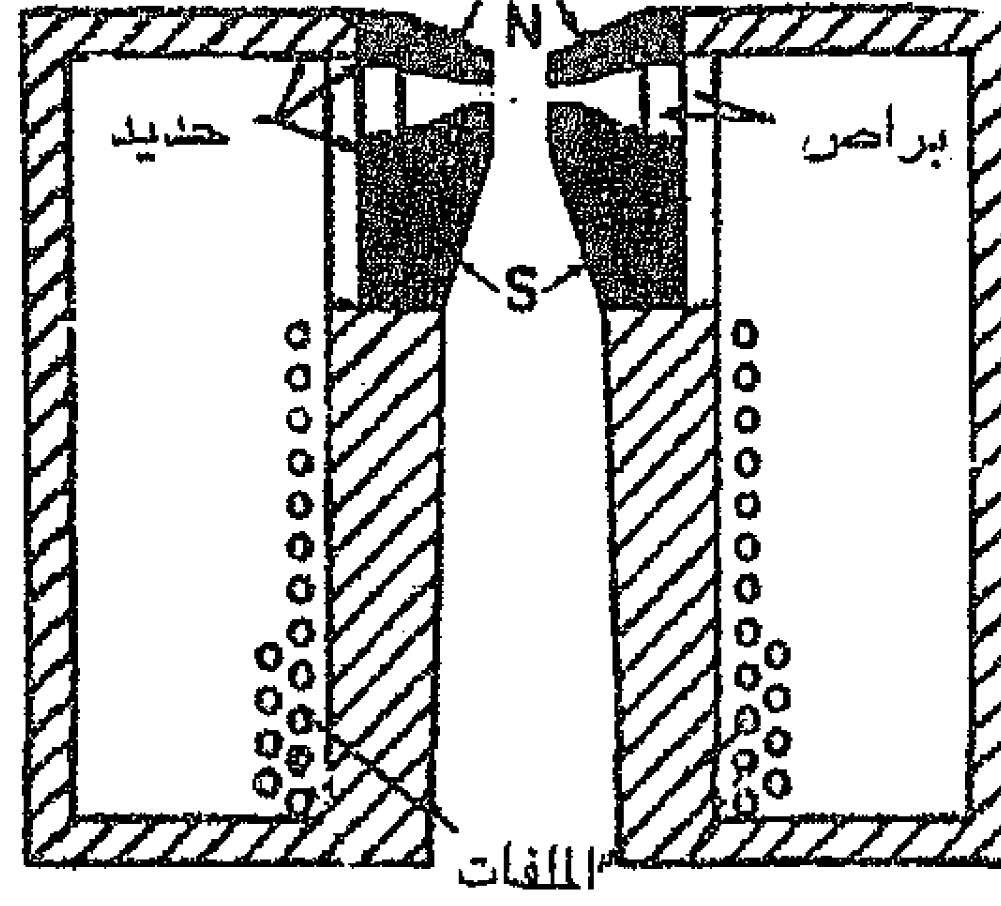



**الشكل (7-3) مخطط لمجموعة القاذف الالكتروني وفيها ترى عدسة الكهربائية المستقرة التي تلم الحزمة الالكترونية وتظهر كذلك خطوط الجهد المتساوي.**




**الشكل (7-4) أساس العدسة المغناطيسية (a) زوج الأقطاب المغناطيسية الاسطوانية (b) مقطع عرضي يبين خطوط المجال المغناطيسي بالقرب من الفجوة الفاصلة.**

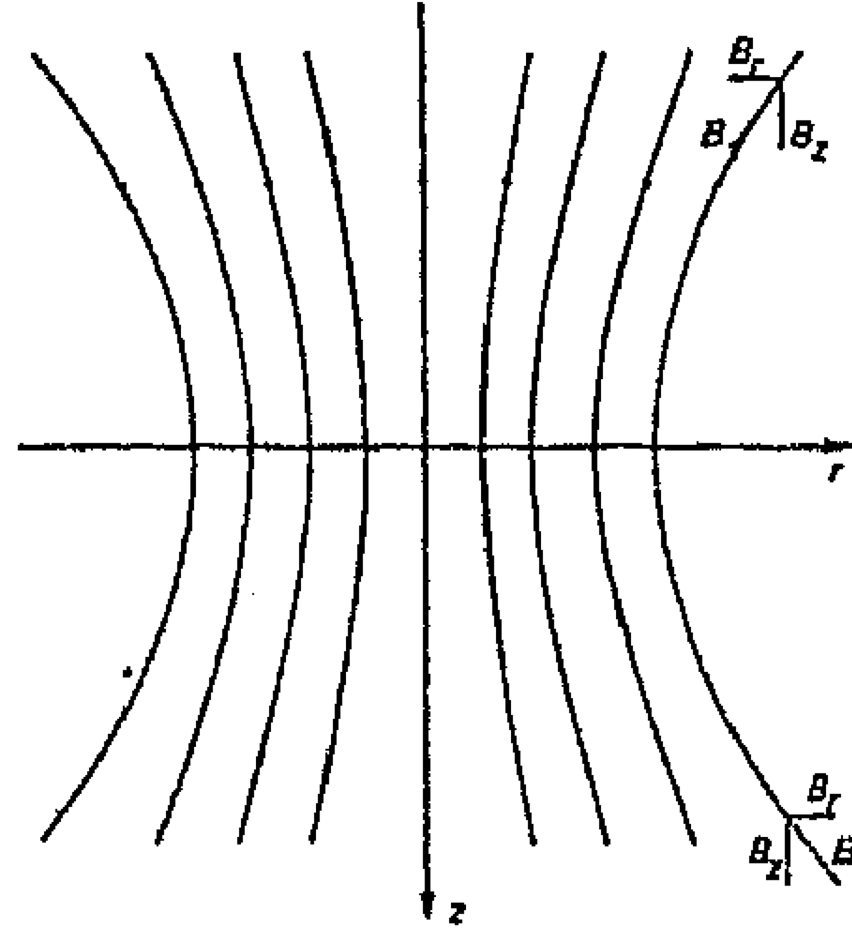
ولا يمثل الزيغ مشكلة كبيرة هنا. ان عدسة المجهر الالكتروني بالأساس هي زوج من أقطاب مغناطيسية اسطوانية تجويفها ذو مقطع دائري منتظم، الشكل (7-4). تُستكمل الدائرة المغناطيسية وتزود العدسه بالطاقة بوساطة ملف ،يحمل تياراً يتراوح مقداره بين 50mA الى 1 Amp، الشكل (7-5).



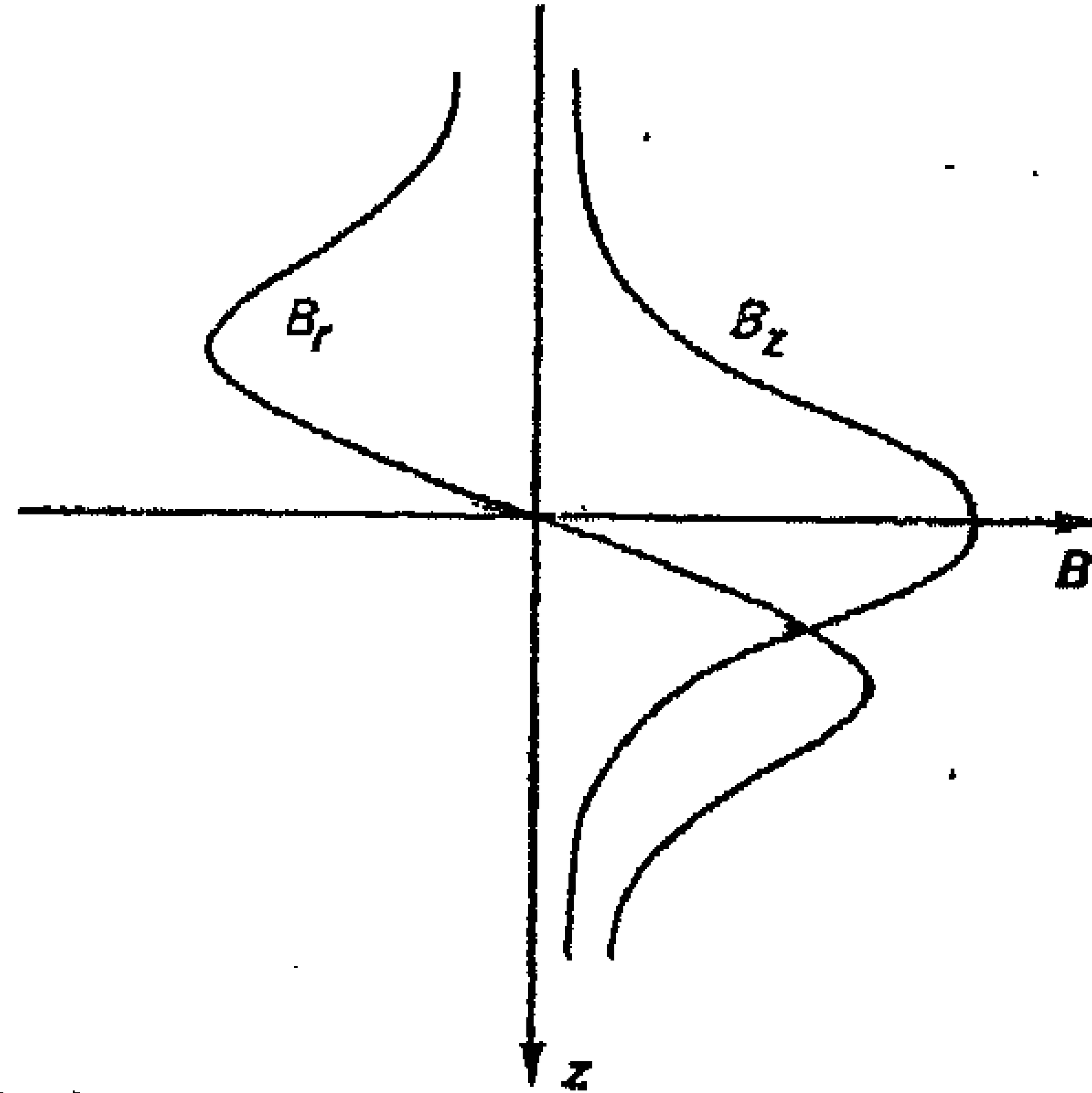

الشكل (7-5) مقطع عرضي لعدسة مغناطيسية نموذجية تستخدم قطعة القطب (المبينه بالأسود) لتركيز المجال المغناطيسي ومن ثم جعل البعد البؤري للعدسة أقصر.

يمكن تمثيل المتجه B بمركبتين هما $B_Z$ باتجاه محور العدسة و $B_r$ باتجاه نصف القطر (الشكل 7-6) . يمكن الآن تصور مسارات الالكترونات التي تدخل العدسة. سوف لايتأثر الالكترون المار تماماً في محور العدسة بالمجال المغناطيسي لان الاخير موازٍ تماماً لاتجاه سرعة الالكترون (اي ان $B_r$ = صفراً). أما الالكترون المار موازياً لمحور العدسة لكنه ليس في المحور تماماً فسوف لايتأثر ابتداءً بمركبة المجال $B_Z$، لكنه سوف يتفاعل مع المركبة النصف قطرية $B_r$ ليؤدي ذلك الى حركةٍ لولبية حول محور العدسة. وحالما تبدأ الحركة اللولبية هذه يكون لسرعة الالكترون مركبة سرعة$V_t$عمودية على $B_Z$ وأن المتجه $v \times B$ يمتلك الآن المركبة $v_t B_Z$ متجهة نحو محور العدسة وبذا تتحقق عملية التبئير. وأخيراً يغيّر$B_r$ اتجاهه (شكل 7-7) لكنه لايتأثر الفعل التبئيري بذلك إلا أن العزم الزاوي الذي يمتلكه الالكترون عند دخوله العدسة يضمحل ويتوقف التدوير. يبين الشكل (7-8) مسار الإلكترون عند دخوله المجال المغناطيسي للعدسه.

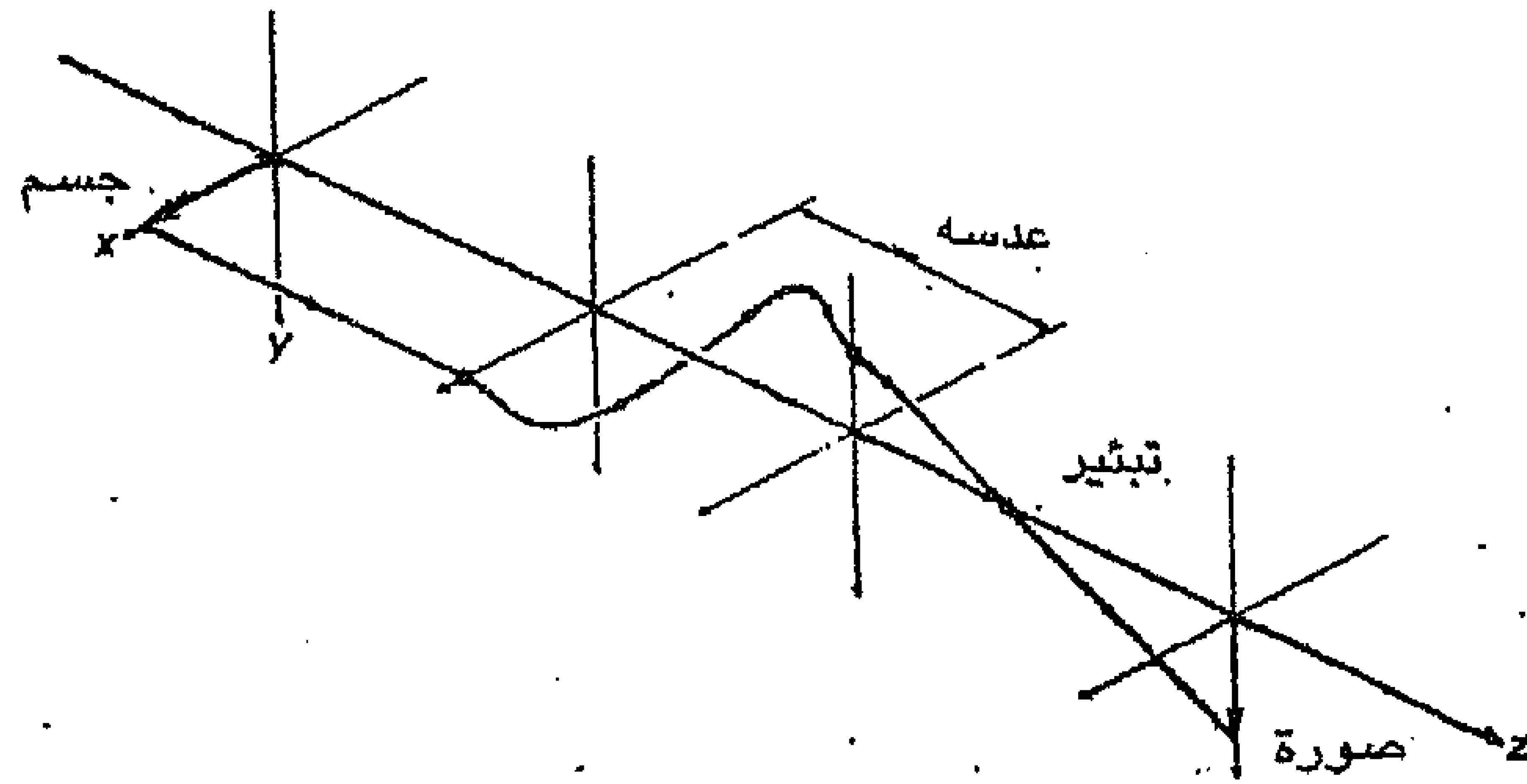
يكون مجمل تأثير مجال العدسة على الحزمة الالكترونية ثنائياً حيث ان الحزمة تستدير كلياً وكنتيجة لهذا الدوران تتبئر . ينتج شيء آخر عن الدوران وهو أن اية صورة تكوّنها العدسة تكون مُداره بالنسبة للجسم بزاوية معينة تعتمد قيمتها على شدة مجال العدسة (في حين ان زاوية الدوران في العدسات الضوئية بالمقارنة ثابتة وتساوي ($180^{\circ}$) . وهذا شيء يجب ادخاله بالإعتبار عند المقارنة بين الصور ذات التكبير المختلف (تكون العدسه ذات شدات مجال مغناطيسي مختلف عند كل تكبير) وخاصة في المجهر الالكتروني النافذ (TEM) .




الشكل (7-6) خطوط المجال المغناطيسي بالقرب من محور العدسة.




الشكل (7-7) المركبتان المحورية والقطرية للحث المغناطيسي (Br , Bz) بالقرب من محور العدسة.




الشكل (7-8) مسار الالكترون خلال العدسة المغناطيسية فالإلكترون يتحرك لولبياً حول محور العدسة ليتبئر عنده.

يمكن اشتقاق معادلات للبعد البؤري للعدسة المغناطيسية (f) بدلالة Bz فقط بالرغم من ان المركبة Br أساسية في مجال العدسة.

$$\frac{1}{f} = \frac{e}{8mV_0} \int_{lens} B_z^2 \, dZ \qquad ......................(11\text{-}7)$$

ان العلاقة (7-11) هي معادلة تقريبية للعدسات المغناطيسية الرقيقة حيث تمثل m كتلة الالكترون و $V_0$ الفولتيه المعجلة للإلكترونات. ومع ان العدسات الحقيقية قد تكون سميكة بالنسبة لتطبيق هذه المعادلة لكنها توضح بعض النقاط العامة التي تصلح لكل العدسات المغناطيسية وهي:

١- ان البعد البؤري يعتمد على نسبة ( $\frac{e}{m}$ ) للجسيم (الإلكترون) وهذا يغاير تصرّف عدسات الكهربائية المستقرة.

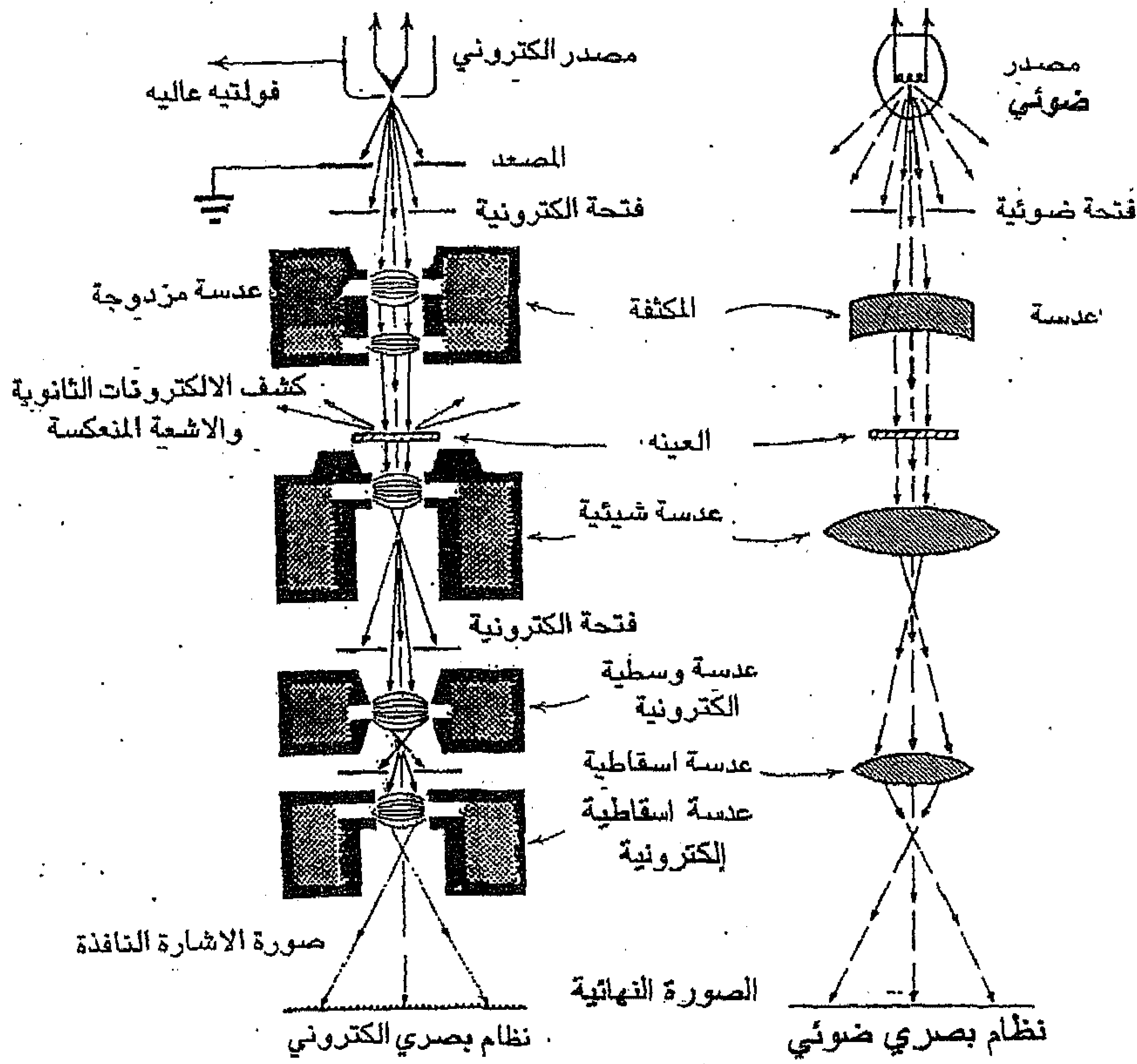
٢- تؤثر الفولتيه المعجلة على البعد البؤري من خلال تأثيرها على سرعة الالكترونات وقد سبقت الاشارة الى ذلك فالإلكترونات الأبطأ تنحرف بسهولة والعكس صحيح. لذلك فالإستقرار العالي في الفولتيه المعجلة (بحدود جزء لكل $10^5$ من الأجزاء) شيء أساسي لتقليل الزيغ اللوني.

٣- يكون البعد البؤري موجباً مهما كانت إشارة الحث المغناطيسي للعدسه.

٤- يكون البعد البؤري أقصر عند الحث المغناطيسي (Bz) الاعلى. إذن يمكن تغيير البعد البؤري للعدسة الكهرومغناطيسية بتغيير التيار المار بها (المار بالملف). وهذا شيء ملائم جداً عند تبئير الصور وفي حالة المجهر الإلكتروني النافذ (TEM) عند تغيير التكبير ايضاً، تختلف الحال في المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) وذلك لعدم وجود عدسه لتكوين الصوره اي عدم وجود العدسة الشيئية وانما يتم بناء الصوره شيئاً فشيئاً بما يتشابه وجهاز التلفاز (Tele-vision). وللحصول على قدرة تمييز اعلى يجب ان يكون التيار المار بالعدسة اكثر استقراراً اي بحوالي جزء واحد لكل $10^6$ من الأجزاء.

### ٣-٥-٧ تصميم المجهر الإلكتروني النافذ:

بما أن عمل العدسة الكهرومغناطيسية مشابه لعمل عدسة الضوء الزجاجية، فإن التصميم الأساس للمجهر الإلكتروني ، كنتيجة لذلك، مشابه للمجهر الضوئى كما مبين في الشكل(7-9) التخطيطي حيث يتشابه ترتيب العدسات ومسار الاشعة في كليهما.




**الشكل (7-9) مقارنة تخطيطية بين نظامي المجهر الضوئى النافذ والمجهر الإلكتروني النافذ.**

يتألف المجهر الالكتروني النافذ بصوره مبسطة من الاجزاء الرئيسية التالية:

١- مصدر (قاذف) الالكترونات.

٢- عدسات مكثفة.

٣- عدسه شيئية وعدسات مكبرة أخرى (العدسة الوسطية والعدسة الاسقاطية).

٤- شاشة لاظهار الصورة عليها.

٥- كاميرا لتسجيل الصورة.

٦- مصدر قدرة للتجهيز بالفولتيه المعجلة وما تتطلبه الدوائر الكهربائية الأخرى.

**أ- مصدر الالكترونات او قاذف الالكترونات:**

وقد يتغير تصميم قاذف الالكترونات ( electron gun) بشكل أو آخر في المجاهر المألوفة ، لكنه يتألف في أغلب الاحيان، من شعيره (filament) تنكستن قطرها تقريباً 0.1 mm . يكون شكل شعيرة التنكستن على شكل حرف(V) يبعث او يطلق الالكترونات من الجزء المدبب الموجه نحو الأسفل اي باتجاه عمود المجهر. يعطي هذا التصميم اعظم انبعاث للإلكترونات مركزه من مساحة صغيرة جداً اي ان الإلكترونات مركزة في حزمة الكترونية اوليه ضيقة. تُجعل الشعيرة كمهبط ذو جهد سالب نسبة الى المصعد المربوط بالأرضي(earth) . تنبعث الالكترونات من الطرف المدبب للشعيره بواسطة الانبعاث الحراري (thermoionic emission) الذي مرّ ذكره سابقاً.

ان خواص الانبعاث الحراري للإلكترونات هي التي جعلته اكثر ملائمة للأجهزة الإلكترونية الضوئية. فالإلكترونات المنبعثة حرارياً تمتلك تجانساً أكثر من حيث السرعة في الحزمة الإلكترونية الأولية مما يقلل التشويش الحاصل في الصوره النهائية.

يبين الشكل (7-3) تخطيطاً لتصميم قاذف الكتروني حيث يتغير موقع وشكل غطاء الشبكة والمصعد اعتماداً على التطبيقات المعينه. تكون الشعيره ذات فولتيه اقل سالبيه من غطاء الشبكة (grid) بحوالي 100 الى 1000 فولت أما المصعد (anode) فهو مأرض (متصل بالأرضي) اي عند جهد ارضي (ground potential) . وهذا الترتيب يحسن استقرارية تيار الانبعاث ويساعد في تركيز حزمة الالكترونات. تعمل منظومة قاذف الالكترونات عمل عدسة الكهربائية المستقرة ايضاً كما مرّ ذكره.

**ب- العدسة المكثفة:**

تعمل العدسة المكثفة على تنظيم شدة حزمة الالكترونات في المجهر . كما أنها تجمّع (تلم) الحزمة الالكترونية عند وصولها الى النموذج المراد فحصه. تتكون العدسة المكثفة من عدسه مزدوجة عادةً . ان تجميع الحزمة الالكترونية بفعل هذه العدسة مع استخدام فتحات صغيرة لمرور الالكترونات في هذه المرحلة كل ذلك يؤدي الى تباين (contrast) صوري جيد للنموذج في المجهر الإلكتروني النافذ. يتم تعزيز تأثير العدسة في المكثف ومايتبعه من عدسات (الشكل7-9 ) بتركيز خطوط المجال بوساطة فتحة قطب العدسة المغنطة بشدة والتي لها ترتيب معين و أقطار محدده. يمكن التعبير عن البعد البؤري للعدسة المكثفة($f_c$) بالآتي:

$$f_c = \frac{\zeta_c V_o}{N_c^2 I_c^2} \qquad \text{............ (12-7)}$$

حيث تمثل $\zeta_c$: العامل الهندسي التصميمي للعدسة المكثفة.

$N_c$ عدد لفات السلك النحاسي في ملف المكثف .

$V_o$ جهد تعجيل حزمة الالكترونات بالفولت.

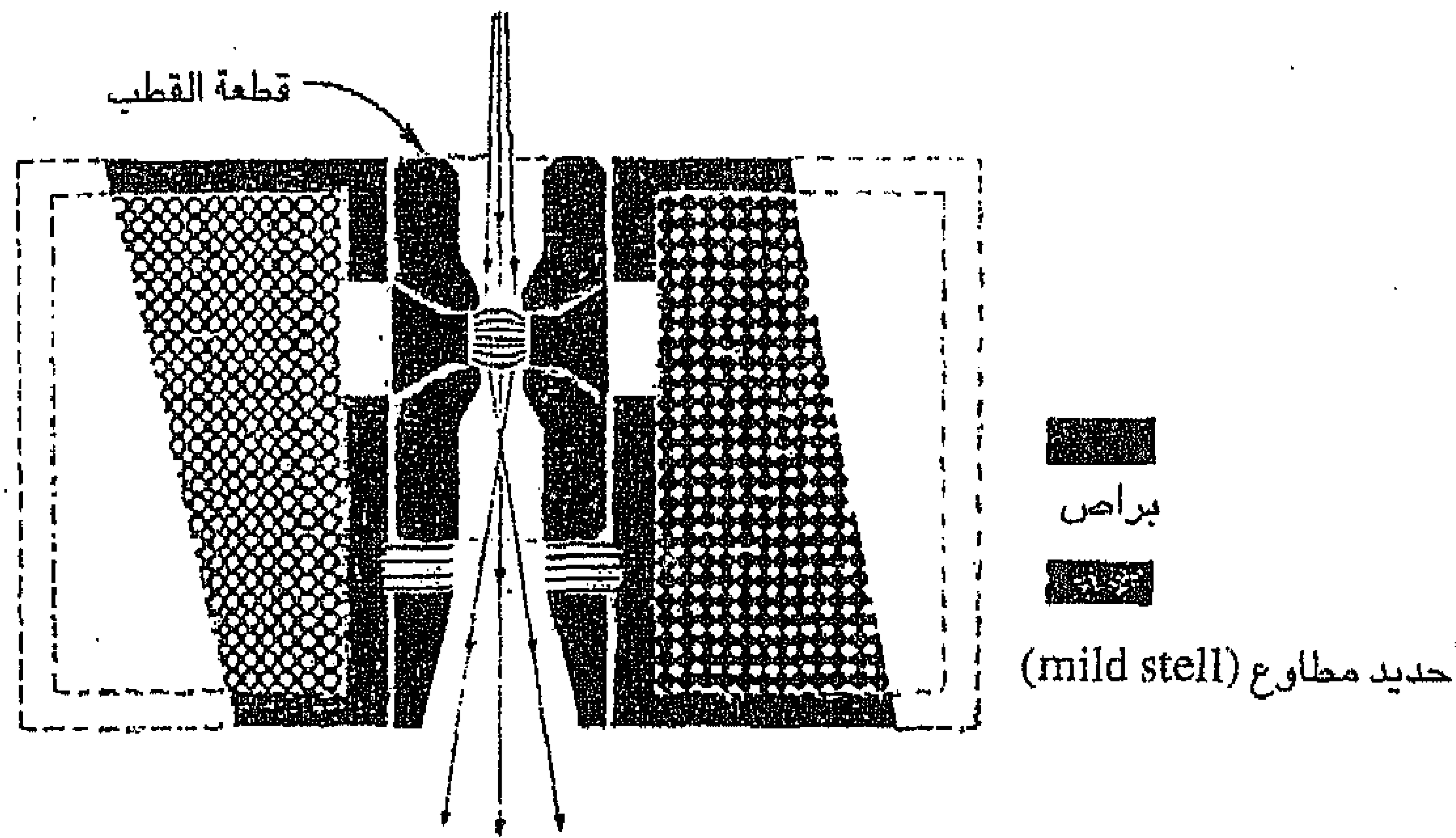
$I_c$ التيار المار بملف المكثف بالأمبير.

ومنها يتضح ان زيادة التيار المار تقلل البعد البؤري للعدسه وبذلك يمكن تبئير الحزمة الالكترونية على النموذج.

**جـ- العدسة الشيئية Objective lens :**

تقوم العدسة الشيئية في المجهر الالكتروني النافذ، على سبيل المثال، بنفس وظيفة العدسة الشيئية الزجاجية وهي بالتحديد تبئير معالم النموذج. اي ان العدسة الشيئية تكوّن اول صوره مكبرة للجسم وتبين معالمه. تختلف العدسة الإلكترونية الشيئية عن العدسات المكثفة السابقة او العدستين الإسقاطية (projection lens) او الوسطية (Intermediate lens) في انها ذات اداء عالي اي في امكانية تصغير بعدها البؤري الى مدى بحدود (1mm) ويكون تصنيع فتحة أقطابها دقيقاً جداً وذات ابعاد مضبوطة الى حد كبير.

يبين الشكل (7-10) تصميم هيئة العدسة الشيئية تخطيطياً.




**الشكل(7-10) تصميم لعدسة شيئية (بصورة تخطيطية).**

يتم حساب البعد البؤري للعدسة الشيئية باستخدام نفس معادلة (7-12) مع مراعاة قيمة التيار المار في العدسة الشيئية وعدد لفات ملفها وعاملها الهندسي. يكون التيار المار في الشيئية عالي نسبياً ولذلك تتطلب العدسات الكهرومغناطيسية، وخصوصاً الشيئية منها، تبريداً مستمراً نتيجة للحرارة المتولدة عن مرور التيار الكهربائي.

**د- العدسات الوسطية والاسقاطية Intermediat and projection Lenses:**

ان وظيفة العدسة الوسطية في اغلب المجاهر الالكترونية هي السيطرة على قوة التكبير(magnification) حيث يتم التحكم في تكبير الصوره النهائية عادةً بالتحكم في تيار العدسة الوسطية، ومن الجدير بالذكر، فإن مقدار تكبير الصورة النهائية يعيّن بحاصل ضرب تكبير العدسات الشيئية والوسطية والاسقاطية اي أن:

$$M = M_o \, M_I \, M_p \qquad ..............(13\text{-}7)$$

حيث تمثل $M$ مقدار التكبير النهائي للصورة.

و $M_o$ مقدار تكبير العدسة الشيئية.

و $M_I$ مقدار تكبير العدسة الوسطية.

و $M_p$ مقدار تكبير العدسة الإسقاطية.

**٤-٥-٧ الزيغ في العدسات المغناطيسية:**

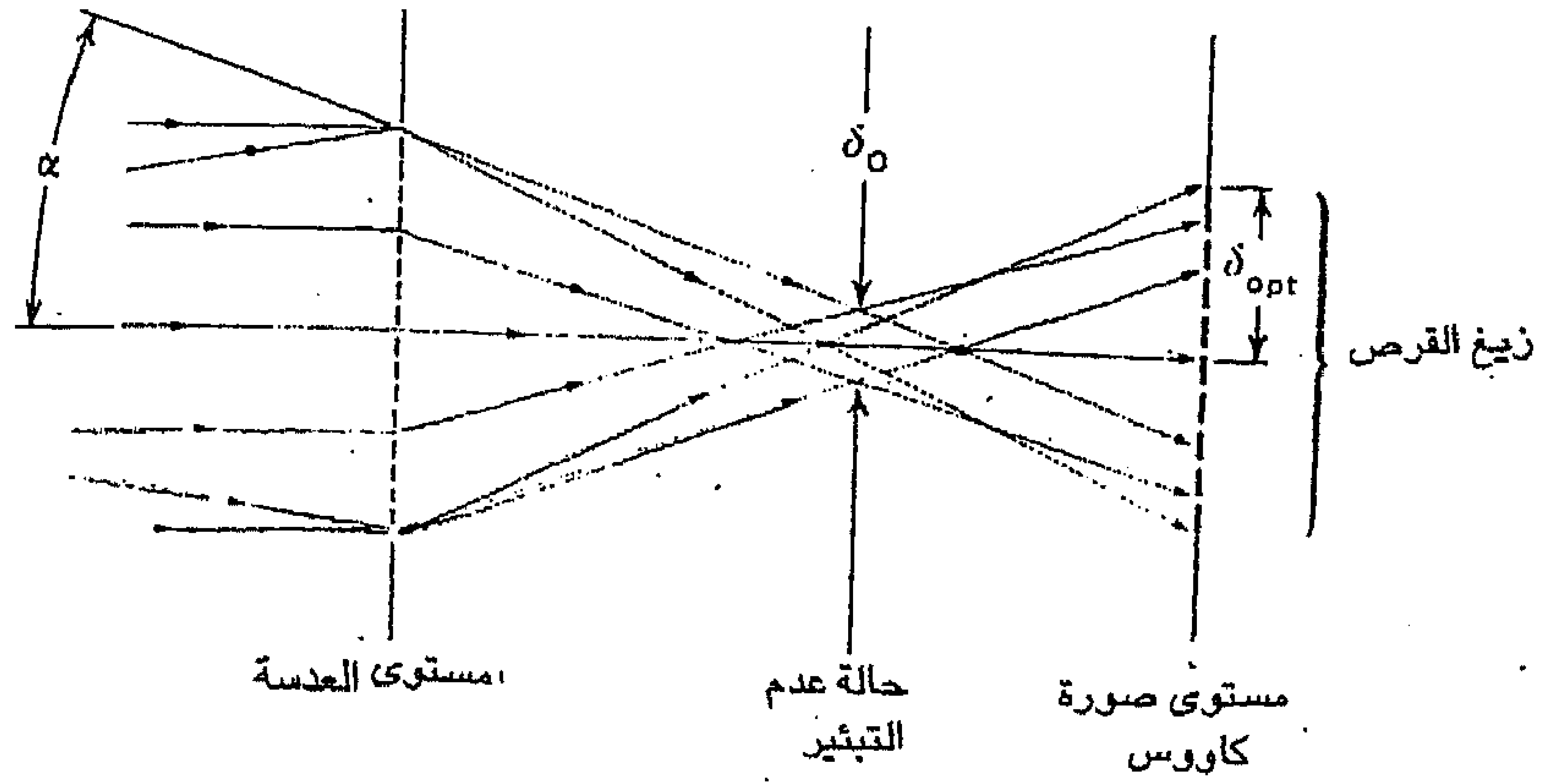
انه لشيء مفاجئ حقاً ان تكون عيوب العدسات المغناطيسية مشابه تماماً لعيوب العدسات الضوئية بالرغم من اختلاف طبيعة الاشعة المستخدمة والعدسات وتصميمها وكيفية عمل كل منها. سنقتصر بالحديث هنا عن اهم هذه العيوب وأسبابها وكيفية التخلص منها.

**أ- اللابؤرية:**

تحصل هذه الظاهرة عندما يوجد بعد بؤري أكبر (باتجاه معين وعند مستو ما) من البعد البؤري الآخر بالاتجاه العمودي على الاتجاه الاول وفي نفس المستوى. ان سبب ظهور هذا العيب هو عدم كون مقطع فتحة قطب العدسة دائرة مضبوطة تماماً. او قد يكون السبب استخدام فتحة غير دائرية بالضبط لتحديد قطر الحزمة الالكترونية مما يسبب تشويهاً بيضوياً في مستوى الصورة عند تبئير الحزمة الالكترونية يمكن ازالة اللابؤرية بادخال المبئرات (stigmators) في المناطق المناسبة من نظام عدسات المجهر وذلك لتعديل وتلافي عدم الاستدارة في شكل صورة الحزمة في مستوى الصورة. يتكون المبئر من أجزاء (ملفات صغيرة) مولدة للمجال المغناطيسي تعمل على إزالة الشكل البيضوي لصورة الحزمة و تغييره او تعديله الى شكل دائري منتظم.

**ب- الزيغ الكروي:**

تتبئر الإلكترونات القادمة من مناطق مختلفة من الجسم نسبة الى المحور الضوئى تماماً قبل مستوى العدسه عند نقاط تختلف قليلاً بالبعد عن بعضها وذلك بسبب طبيعة هندسة المجال المغناطيسي للعدسة الالكترونية. تؤدي هذه الظاهرة الى تقليل حدة الصوره على المحور الالكتروني الضوئي (الشكل7-11) وتعتمد بدرجة كبيرة على زاوية الفتحة $\alpha$ . يدعى هذا الزيغ احياناً بعيب الفتحة. يعتبر الزيغ الكروي من أهم عيوب العدسات لأنه العيب الذي يحد من قدرة تمييز الاجهزة الالكترونية الضوئية مثل المجهر الالكتروني النافذ والمحلل الالكتروني الدقيق وغيرها.




**الشكل(7-11) قرص الزيغ وقرص التشويه الأقل ( δo ) في حالة الالكترونات.**

بما أن العدسة التي تكوّن الصورة في المجهر الالكتروني هي العدسة الشيئية فسيكون التركيز في الكلام حول الزيغ في هذه العدسة. يمكن وصف قطر التشويه $\delta sp$ الناتج من الزيغ الكروي بالآتي:

$$\delta_{sp} = 2Cs\ \alpha^3 \qquad \text{.............. (14-7)}$$

حيث يمثل $C_s$ معامل الزيغ الكروي والذي يعطى بالعلاقة

$$Cs = \delta_o \left( \frac{V_o}{N^2 I^2} \right)^2 \qquad \text{............. (15-7)}$$

لقد لوحظ ان الزيغ الكروي يتناسب مع مربع البعد البؤري للشيئية المعطى بالمعادلة (7-12) وفتحة العدسة α. لذا يمكن كتابة المعادلة (7-15) كالآتي:

$$C_S = \frac{\delta_o f_o V_o}{(NI)^2} \qquad \text{.............. (16-7)}$$

$\delta_o$ ثابت تتراوح قيمته بين 100 للعدسات القوية و 150 للعدسات الضعيفة. اذن يعتمد الزيغ الكروي على التغيير في البعد البؤري مع الفولتيه كما يعتمد بشده على فتحة العدسة α . يكمن تصحيح الزيغ الكروي في تصميم عدسات يكون توزيع مجالاتها المغناطيسية بشكل خاص بحيث يحقق زوايا فتحة صغيرة مع انخفاض

آني في قيمة ($C_s$) . كما ان استخدام الفتحة (aperture)يخفض الزيغ بصورة ملحوظة ومن ثم يزيد من حدة الصورة.

**جـ- الزيغ اللوني:**

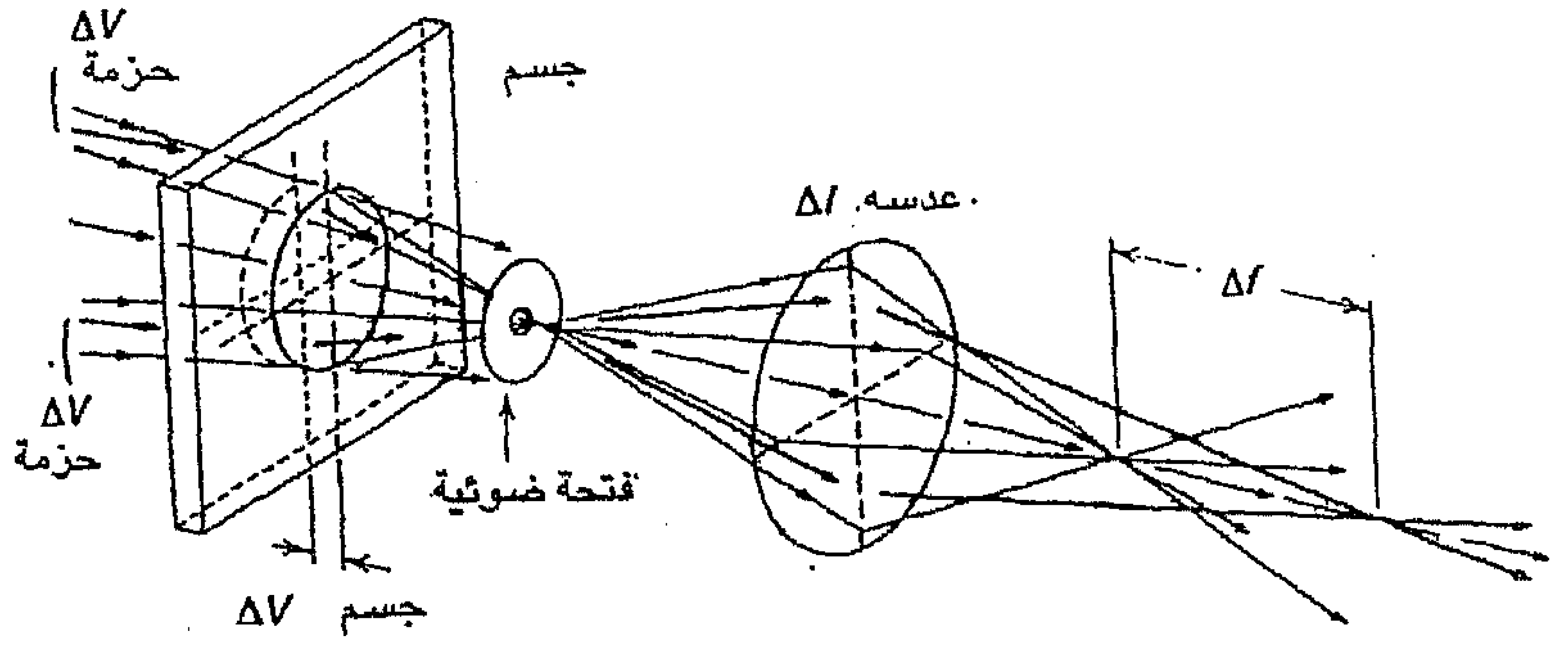
ان بعض العيوب ومنها العيبين المذكورين للتو (اللابؤرية والزيغ الكروي) تتولد بسبب خواص العدسة الالكترونية نفسها، مع العلم ان هناك عيوب أخرى ناشئة بسبب خواص الحزمة الالكترونية نفسها. وبقدر ما يتعلق الامر بالعدسة الشيئية فإن الزيغ اللوني يظهر كإنخفاض او نقصان في تباين الصوره وهو ناتج من الاختلاف في سرع الكترونات الحزمة الإلكترونية نفسها والذي يصاحبه تغيير في البعد البؤري نتيجة لعدم استقرارية التيار المار في ملفات العدسه. يبين الشكل (7-12) المعنى الفيزياوي لهذا الزيغ تخطيطياً. يلاحظ هنا أنه عند التغييرات الكبيره في البعد البؤري للشيئية ($f_o$) على سبيل المثال، فإن مكان الصوره يتصف بتغيير في قطره واستدارته وتكبيره. يعتمد الزيغ اللوني على الفقدان في طاقة الالكترون $\Delta V$ والتغيير في تيار العدسه $\Delta I$ ويمكن التعبير عنه بالآتي:

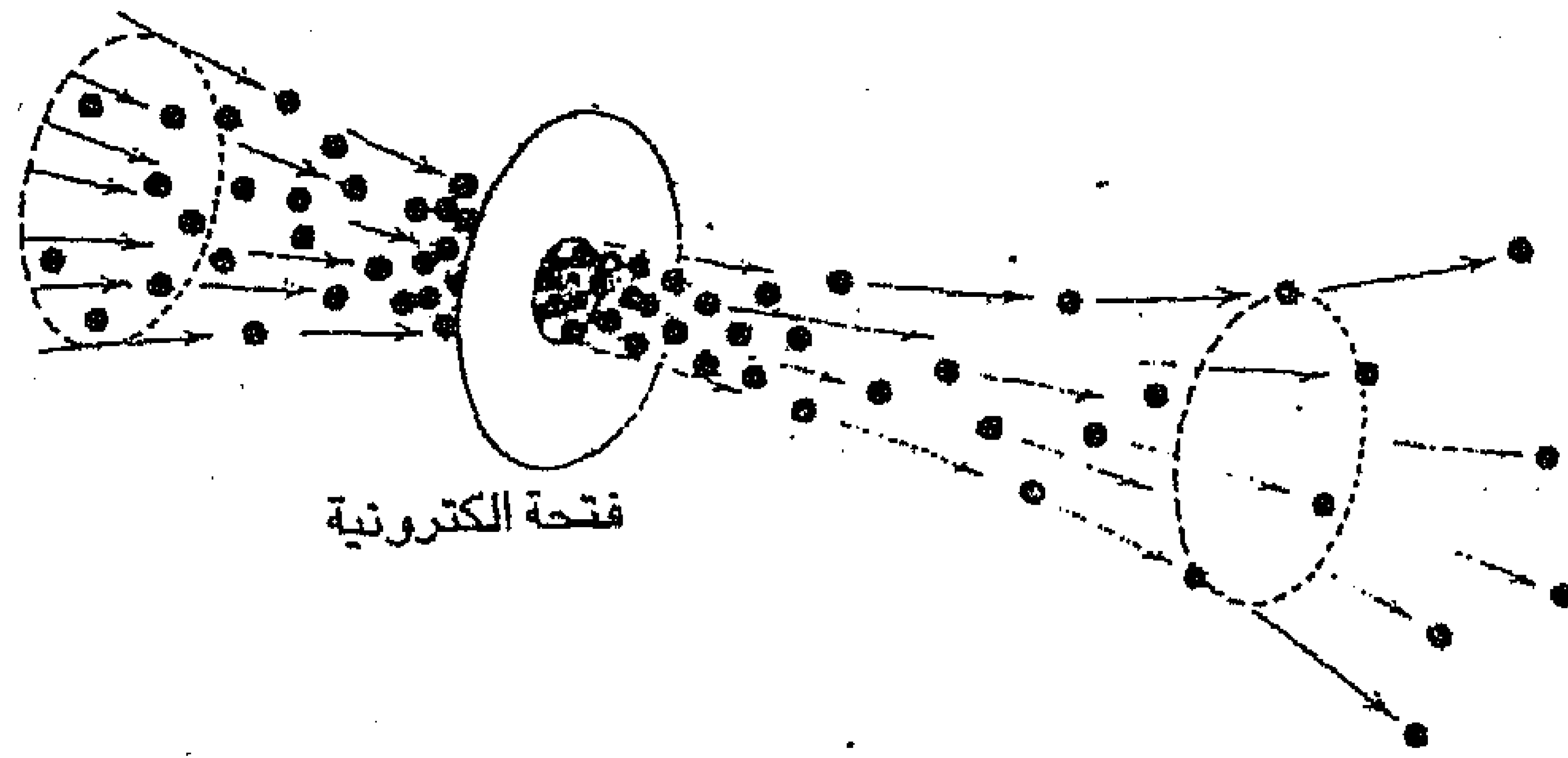
$$\delta_{cr} = 2\, C_c \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta V}{V_o}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta I}{I}\right)^2} \qquad ..........(17\text{-}7)$$

تمثل Cc معامل الزيغ اللوني في العدسة الشيئية كما أن :

$$C_c = \delta'_o f_o \qquad .................. (18\text{-}7)$$

$\delta'_o$ ثابت تتغير قيمته بين 0.5 و 1 للعدسه الضعيفة او القوية على التعاقب. يمكن التقليل من هذا الزيغ باستخدام اجهزة استقرار الفولتيه والتيار. الواقع هناك بعض التغيير في طاقة الالكترونات اثناء مرورها في النماذج السميكة نسبياً ايضاً، مما يؤدي الى نفس الظاهرة على وجه التقريب ولذلك يحبذ استخدام نماذج رقيقة نسبياً او استخدام فولتيات عاليه جداً كما في حالة المجهر الإلكتروني النافذ ذو الفولتيه العالية ( High Voltage Transmission Microscope)




**الشكل (7-12) الزيغ اللوني وزيع شحنة الحيز (a) الزيغ اللوني (b) تأثير شحنة الحيز (بصورة مبالغ فيها).**

## ٥-٥-٧ وضوح الصورة وقدرة تمييز العدسة الشيئية:

لقد تم التنويه عن ان قدرة تمييز العدسة ومن ثم وضوح الصورة تتأثر بمقدار الزيغ الكروي واللوني إضافة الى الطول الموجي ولو ضمت كل هذه المتغيرات الى بعضها لتم الحصول على علاقة بين هذه المتغيرات وحد التمييز ($\delta opt$) .

$$\delta_{opt}= \sqrt{\delta^2_{pp}+(\frac{\delta_{sp}}{2})^2+(\frac{\delta_{cr}}{2})^2} \qquad ...............(19-7)$$

حيث يرمز $\delta_{pp}$ لحد التمييز الذي يعتمد على الطول الموجي وكالآتي:

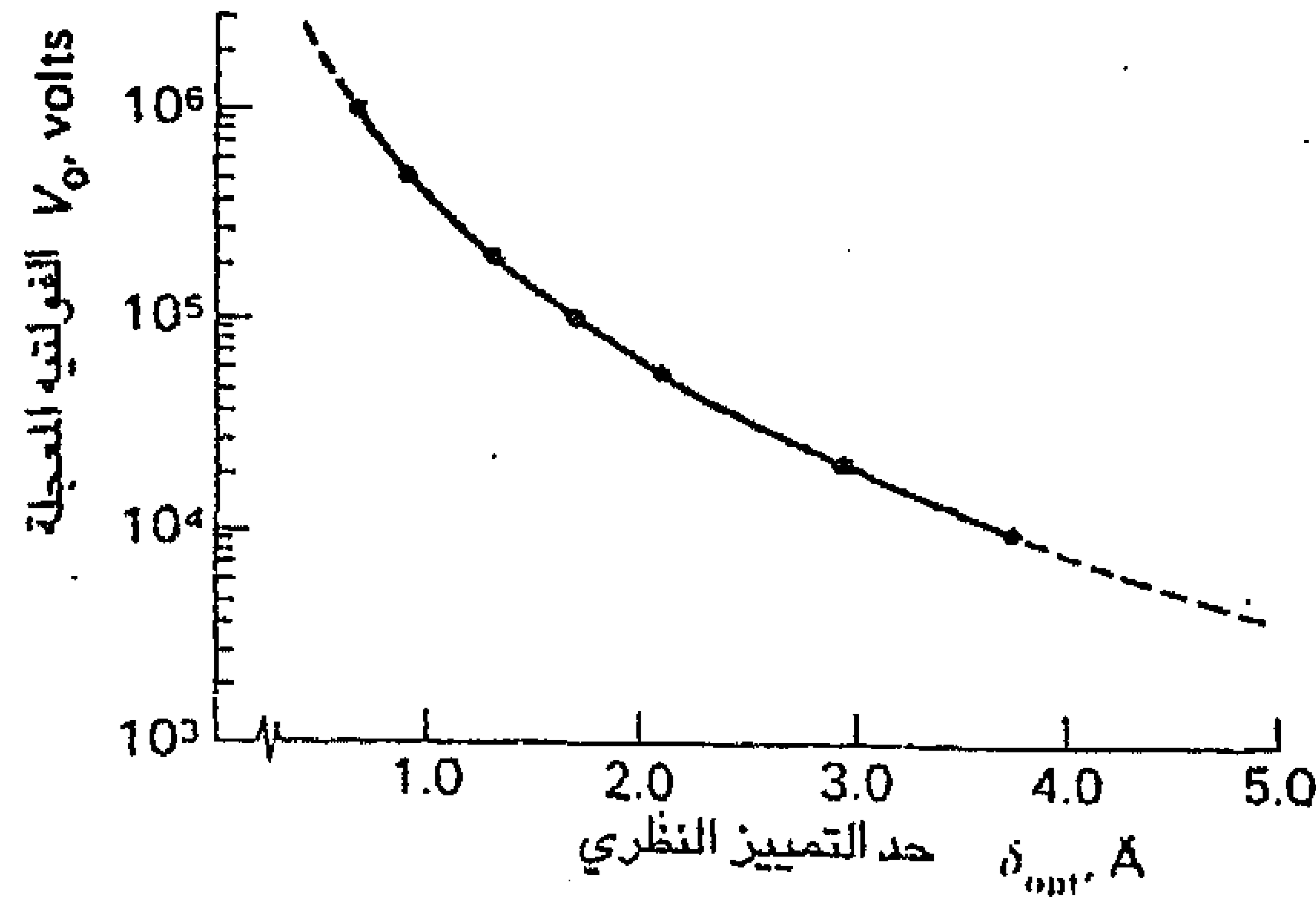
$$\delta_{pp}= \frac{0.61\lambda}{\alpha} \qquad ................(20-7)$$

يستخدم قرص (قطره الكلي بحدود 3mm) يحتوي على ثقب في مركزه يتراوح قطره بين 20 الى 400µm (حسب ما يتلائم وعملية الفحص حيث توجد عادة عدة اقراص في كل مرحلة سواء مرحلة العدسة المكثفة الأولى او الثانية او العدسة الشيئية فيتم اختيار الافضل ) لتقليل الزيغ الكروي اولاً وثانياً لمنع مرور الالكترونات المحاده ومن ثم السماح فقط للإلكترونات النافذة لتكوين الصوره. يؤدي كل ذلك الى زيادة تبئير الصورة لكنه من مساوئ استخدامه هو الانخفاض الكبير في شدة الاضاءة . يسمى مثل هذا القرص بالفتحة الضوئية (aperture) .

يمكن حساب قطر الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية والتي تمنع الحزم الالكترونية المحاده عن اول مستوى حيود او ثاني... إذا كان النموذج المفحوص مادة بلورية القوام.أما إذا لم تكن المادة بلورية فإن الفتحة الضوئية سوف تزيد ايضاً من تبئير الصورة باعتبار ان ادخال الفتحة الضوئية عند العدسة سيقلل من الزيغ الكروي.

يبين الشكل(7-13) تغيّر حد التمييز المحسوب $\delta_{opt}$ مع تغيير الفولتيه المعجلة Vo .

يمكن حساب قطر الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية التي تمنع الحزمة الالكترونية المحاده من اول مستوى حيود، على سبيل المثال، لنموذج من مادة بلورية ولتكن الالمنيوم (Al).




**الشكل (7-13) حد التمييز النظري كدالة للفولتيه المعجلة في المجهر الالكتروني.**

فمن معادلة براك للحيود (تصلح لكل أنواع الحيود سواء حيود الاشعة السينيه او الالكترونات....) $\lambda = 2d \sin \theta$ ( المعادلة 5-5) وحيث أن بنية الألمنيوم هي FCC (مكعب متمركز الوجه) وبموجب معامل البنية الذرية (F) (الجدول (5-2) يكون اول مستوى يمكن ان يعمل على حيود (او انعكاس) الالكترونات (reflecting plane) هو (111) .

ولو أخذنا علاقة (d) مع أدلة ملر للمستوى العاكس (معادلة 5-3) للبلورة المكعبه وهي:

$$d = \frac{a}{h^2+k^2+l^2}$$

حيث تمثل a ثابت البلورة = 4.05Å للألمنيوم.

فيمكن حساب (d) للإنعكاس (111). يتم تعويض قيمة (d) في معادلة براك (معادلة 5-5) إضافةالى تعويض قيمة الطول الموجي (λ)للحزمة الالكترونية عند فولتيه معجلة محدده (معادلة 7-7) عندئذٍ يمكن حساب زاوية الحيود (θ) .

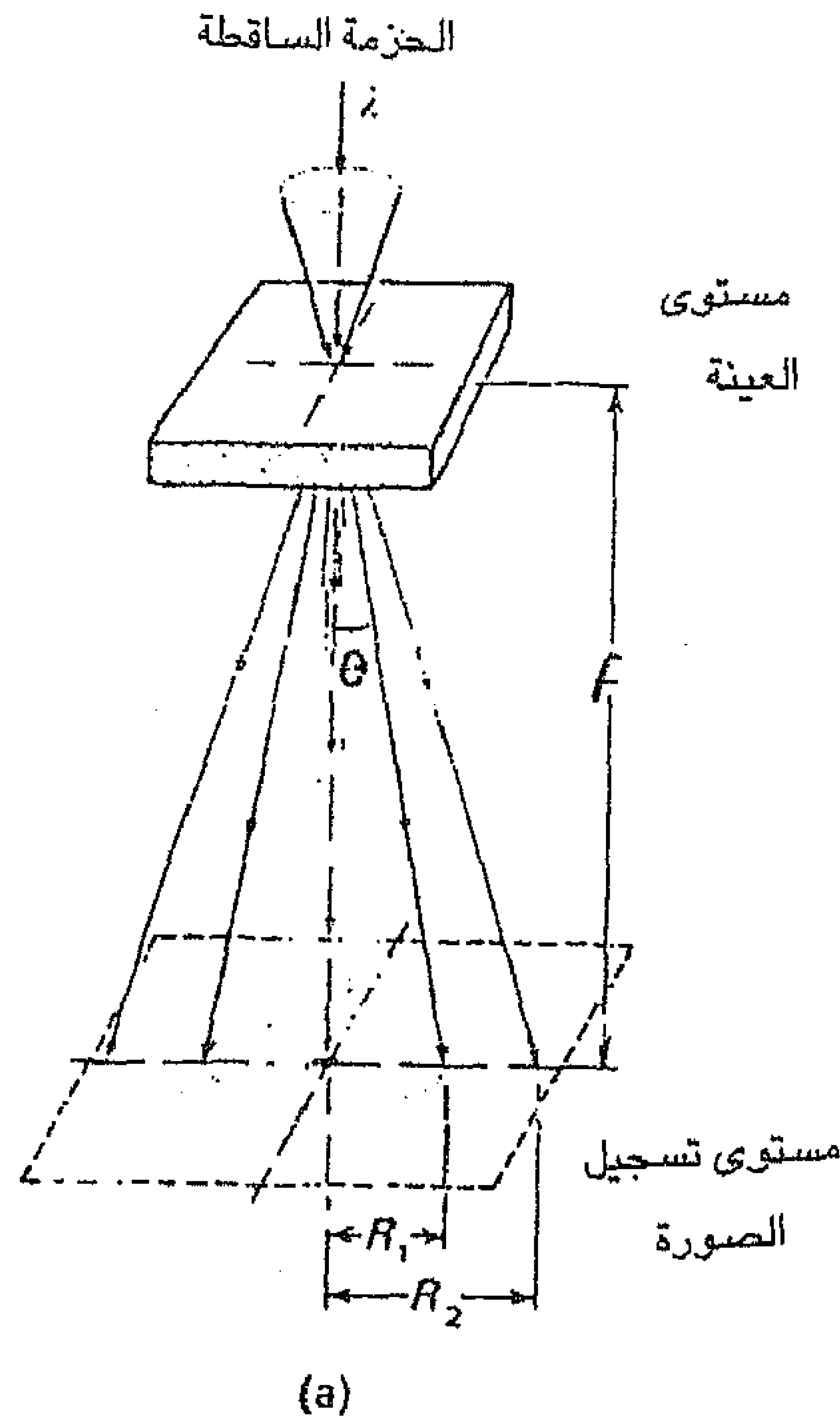
ولإيجاد نصف قطر الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية (R) يمكن تأمل الشكل (7-14) فعند معرفة البعد البؤري (f) فإن:

$$\tan 2\theta = \frac{R}{F} \quad \text{.......... (7-21)}$$

R نصف قطر حلقة (خط) الحيود الخاصة بالمستوى الأول (111) . وإذا كانت الزاوية 2θ صغيرة فيمكن تقريب المعادلة (7-21) لتصبح:

$$R=2\theta f \quad \text{...........(7-22)}$$

أما إذا لم يكن البعد البؤري للعدسة الشيئية معلوماً فيمكن استخدام المعادلة (7-12) لحسابه مع الأخذ بنظر الاعتبار العامل الهندسي والتيار المار وعدد اللفات الخاصة بالعدسة الشيئية.

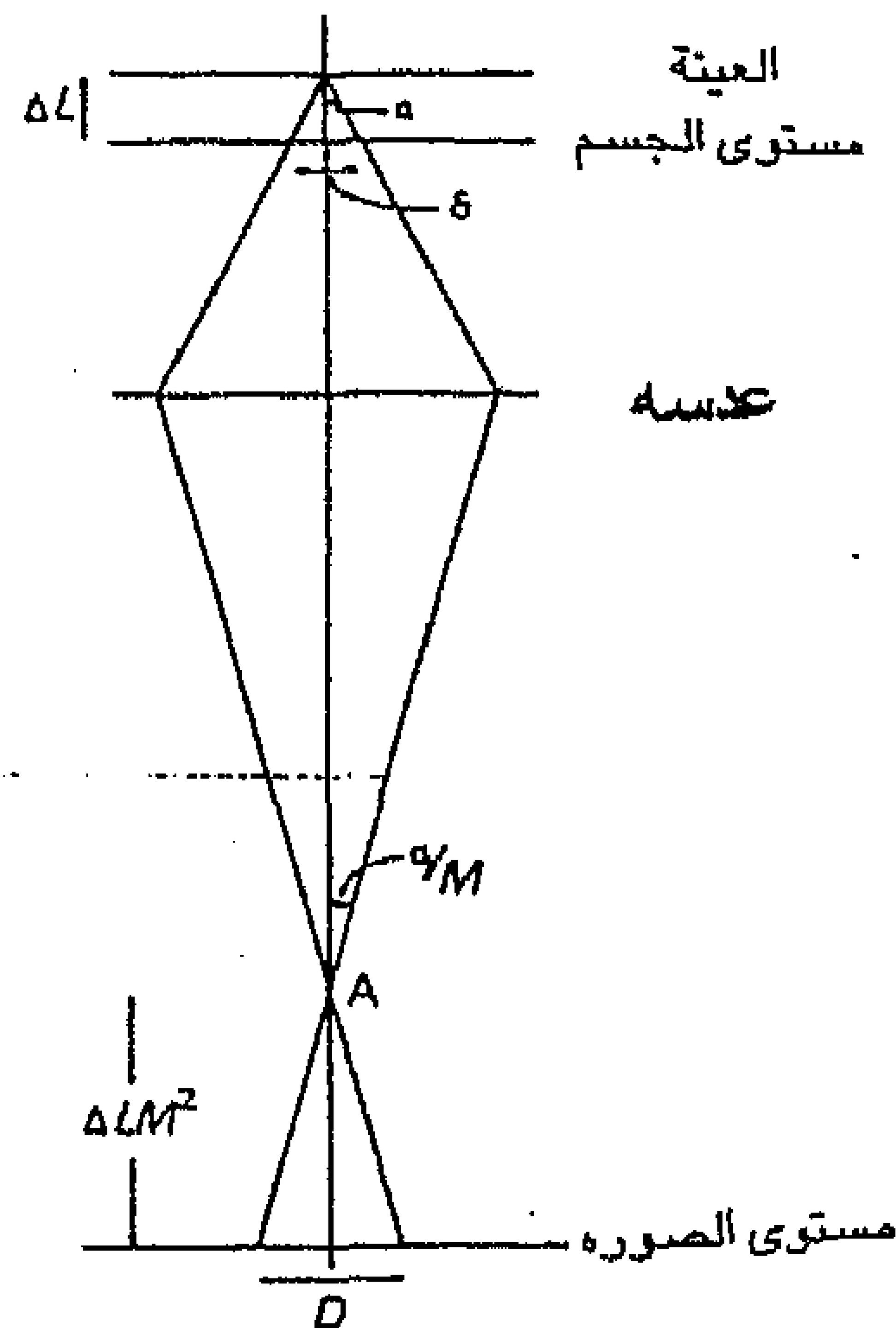



**الشكل (7-14) هندسة تكوين نمط حيود الالكترونات النافذة. تُرى حلقتي حيود لمستويي الانعكاس الاول والثاني.**

ومن الناحية العملية تؤخذ نصف القيمة المحسوبة لنصف القطر لضمان المنع الكامل لإشتراك الالكترونات المحادة عن اول مستوى انعكاس من النموذج في تكوين الصوره، اي تستخدم فتحة ضوئية عند العدسة الشيئية ذات قطر يساوي نصف القطر المحسوب نظرياً بالطريقة اعلاه.

## ٦-٥-٧ عمق المجال وعمق التبئير Depth of field & Depth of focus

يعرّف عمق المجال في المجهر بأنه المسافة الواقعة على المحور الأساس والتي يمكن للجسم ان يتحرك خلالها من دون النقصان الواضح لقدرة التمييز. فإذا تحرك النموذج مسافة مقدارها $\Delta l$ مبتعداً عن المستوى الذي يتم تبئير العدسه الشيئية عنده فستظهر صورة اي نقطة في الجسم بمثابة قرص على الحاجز الذي تظهر عليه الصورة . ولو لوحظ الشكل (7-15)، لظهر انه إذا أزيح النموذج مسافة مقدارها ($\Delta l$) عن مستوى الجسم الحقيقي للعدسة فالأشعة الخارجة من نقطة على النموذج داخل مخروط الاشعة ذو الزاوية النصفية ($\alpha$) ستبدو وكأنها صادرة عن قرص ذو قطر مقداره $\delta = 2\alpha\Delta L$ في مستوى الجسم. لذلك تولد الازاحة $\Delta L$ عدم وضوح (blurring) في تفاصيل الصوره مقابل عدم وضوح مقداره ($2\Delta L \alpha$) في النموذج. وإذا ما أريد المحافظة على قدرة تمييز المجهر فيجب ان تكون ($\delta$) اقل من اصغر التفاصيل المراد تمييزها.




**الشكل (7-15) يبين علاقة عمق المجال بعمق التبئير.**

فعلى سبيل المثال، إذا فرض ان $\alpha = 6x10^{-3}$ rad وتم أخذ حد التمييز = 400 pm ، فعندها يجب ان لايزيد $\Delta L$ عن حوالي 40nm إذا ما أريد المحافظة على هذا الشرط ليعطينا عمق مجال مقداره $2\Delta L$ والذي يمكن للنموذج ان يتحرك خلاله حيث يساوي في هذه الحالة 80nm . وهذا المقدار أكبر من السمك الاعتيادي للنماذج المستخدمة في الاشغال التي تتطلب قدرة تمييز عالية جداً.ومن الناحية العملية فيمكن اعتبار حد تمييز مقداره 2.5nm مقبولاً، وفي هذه الحالة فإن عمق المجال المتيسر سيكون 400nm. والقيمة الاخيرة اكبر من سمك النماذج المستعملة لحد التمييز هذا، يتبين من ذلك انه تحت الظروف الاعتيادية فإن عمق المجال يكون كافياً لتمييز كل النقاط على مختلف الاعماق في النموذج آنياً.

يعرّف عمق التبئير للصوره بأنه المسافة التي يمكن ان يتم بها تحريك حاجز الصوره بدون ان يؤثر ذلك على قدرة التمييز ويمكن ان تحسب بنفس الاسلوب السابق. تبين الادلة الهندسية البسيطة انه إذا كان مقدار التكبير الخطي للجهاز هو M ، فعندئذ إذا تحركت نقطة في الجسم مسافة مقدارها $\Delta Z$ فالصورة الخاصة بها تتحرك مسافة مقدارها $M^2\Delta Z$ . اذن إذا كان عمق المجال في مستوى الجسم هو $2\Delta L$، فيكون عمق التبئير للصوره هو $2M^2\Delta L$ .

فلو أن قوة التكبير كانت $M = 2x10^4$

وكانت $\Delta L = 400nm$

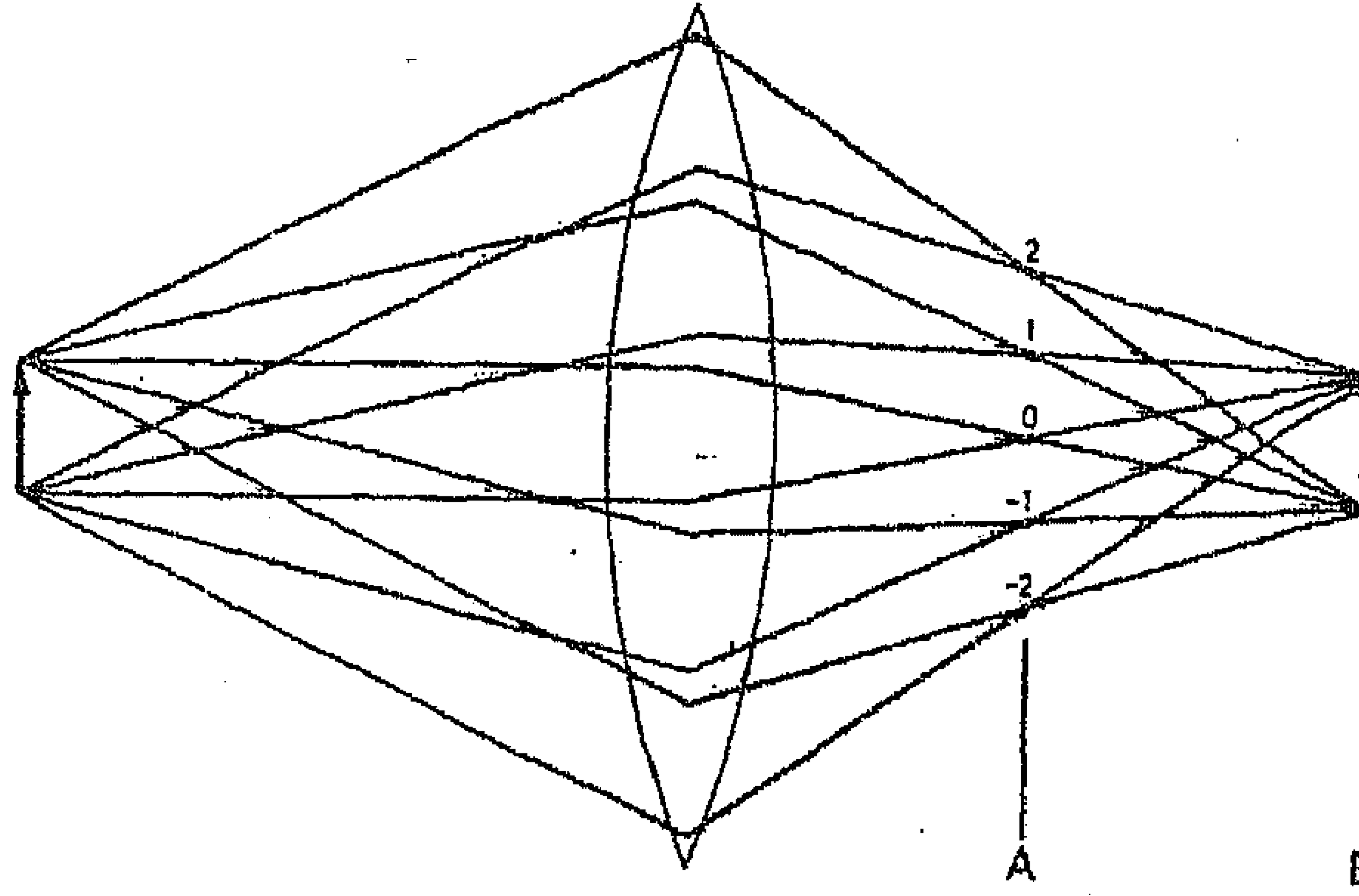
فسيكون عمق التبئير هو 320m. فليس من الضروري كنتيجة لذلك اعادة تبئير المجهر الالكتروني لأجل الحصول على صورة حادة المعالم على اللوح الفوتوغرافي (التصوير) الواقع على بضع سنتمترات تحت مستوى حاجز رؤية الصوره.

## ٧-٥-٧ تقنية حيود الالكترونات Electron Diffraction Technique :

### أ- المقدمة :

تعطي تقنية الحيود ، على سبيل المثال طريقه دبي شرر - Debye scherrer method) لحيود الاشعة السينية، معلوماتٍ كثيرة حول بنية المادة. لأن نمط الحيود في الواقع ليس إلا صورة للنموذج في الحيز المقلوب او في حيّز فورير (fourier space) . ومن هنا يفهم ان هناك علاقة مترابطة ووثيقة جداً بين نمط الحيود للنموذج وصورته ونظراً لأن استخدام تقنية الحيود تستعمل لاستخلاص معلومات عن بنية النموذج وبتمييز عال جداً يصل الى المستوى الجزيئي او الذري لذلك صارت المعلومات المستقاة من صورة النموذج ونمط حيوده تكمل احداهما الاخرى. يمكن فهم الفرق بين نوعي المعلومات المستخلصة من الطريقة التصويرية وتقنية الحيود من الشكل (7-16) والذي يبين بدوره العلاقة بين نمط الحيود والصوره لنموذج معين. فعند إضاءة النموذج بأشعة متوازية احاديه الطول الموجي ، فالزاوية التي يحاد بها الشعاع تعتمد على الطول الموجي للأشعة وعلى المسافة البينيه واتجاه معالم البنيه التي تسبب الحيود . ولذلك تكون كل الحزم المحاده من البنى المتشابهة في النموذج متوازية ومن ثم تتبئر في المستوى البؤري للعدسة. وهذا المستوى هو المستوى A في الشكل (7-16) حيث يتكون نمط الحيود، ولمختلف المراتب، عند هذا المستوى . أما اذا تمّ تعقّب اثر الاشعة بعيداً عن العدسه فسيلاحظ تكوّن (نشوء) الصوره من اتحاد الاشعة لمختلف الحزم المحادة. تتكون الصورة عند المستوى B .ويجب ان تتماثل المعلومات المستقاة من نمط الحيود و الصورة في المجهر (مالم يتم ادخال فتحة ضوئية بين المستويين A و B لتحديد المعلومات) لكنها تتوزع بشكل مختلف. يتضمن نمط الحيود مجمل معلومات عن النموذج ككل في

حين تتجمع المعلومات من نقطة فنقطة في الصورة الاعتيادية لتؤلف مجمل المعلومات عن النموذج.




**الشكل (7-16) العلاقة بين الصورة ونمط الحيود. تغادر الرتب المحاده (2.1.0) المختلفة الجسم ،كحزم متوازية من الأشعة. تبئر هذه الحزم في المستوى البؤري الخلفي (A) للعدسه وتتحد لتكوين الصوره عند المستوى (B).**

يمكن بصوره عامة تحديد كاميرات الحيود ذات الاهمية اضافة تقنيات التصوير المختلفة. تعتبر طرائق الحيود هي الافضل عند تطلب معلومات لمعدل كل مساحة النموذج تحت الفحص، على سبيل المثال تطبيقات طرائق الحيود لتعيين البنية البلورية. بينما لاتستخدم طرائق التصوير الاعتيادي لهذا الغرض حيث ان التباين

الصوري غير كافي عادة لتمييز وحدة الخلية البلورية نفسها.يمكن ان يساعد المجهر الالكتروني ذو قدرة التمييز العالية او مجهر أنبعاث المجال (field emission microscope) في تعيين الشكل العام المعقد للجزئية العضوية ومن ثم يساعد في تحليل البنيه والى مدى معين، في حين ان مجهر ايون المجال (field ion micro-scope) يكوّن صوره للذرات لكنه لسوء الحظ لايمكن استخدامه إلا لعدد محدود من المواد. ويؤثر اي تغيير قد يحدث في بنيه النموذج في نمط الحيود لكن طرائق التصوير الاعتيادي تستخدم في تعيين تفاصيل توزيع الماهيات الدقيقة للبنيه.

تتشابه ظاهرة حيود الالكترونات والنيوترونات مع حيود الاشعة السينيه وكلها تتمخض عن معلومات اجمالية عن النموذج لكن تقنية كل منها تختلف عن الاخرى لان تفاعل كل من الاشعة السينية والالكترونات مع المادة مختلف.

فمعاملات تشتت الالكترونات اعلى بصورة عامة من تلك التي للأشعة السينية وخصوصاً بالنسبة للعناصر الخفيفة.

يمكن ان تزودنا المجاهر الالكترونية بالصور الاعتيادية وكذلك بانماط حيود الالكترونات من مناطق مختاره من هذه الصور. وهذه الامكانية في الحصول على صوره ونمط حيود الالكترونات لمنطقة معينه من النموذج حققت امكانية ممتازة على تزويدنا بمعلومات عديده ومتكاملة عن النموذج.

**ب- الطبيعة الهندسية لانما ط حيود الالكترونات:**

بما أن البلورة عبارة عن ترتيب هندسي منتظم معاد من الذرات، فيتوقع ان تكون انماط الحيود الناتج عن البلورات محتفظة هي الأخرى بانتظام متشابه حتى ولو كانت المنطقة المسببه للحيود متكونة من مجاميع عشوائية الاصطفاف من هذه البلورات. ومن المعلوم ان شرط الحيود يتحقق عندما تقطع كرة الانعكاس نقاط

الشبيكه المعكوسة (reciprocal- lattice point) سواء كانت جزء من مقطع بلوره كبيره او نقاط شبيكة معكوسة لبلوره صغيرة متجهة من مادة متعدده البلورات.

تكون متجهات الشبيكة العكسية أصغر بكثير من نصف قطر كرة الانعكاس الخاصة بتلك البلورة اي ان كرة الانعكاس تقطع مقطعاً مستوياً من الشبيكة المعكوسة والى تقريب جيد . وعند وضع هذا المعنى في الذهن فالعلاقة الهندسية بين الشبيكة المعكوسة ونمط الحيود تسجل على الحاجز المتألق للمجهر الالكتروني او على اللوح الفوتوغرافي أو اية وسيلة أخرى ، يبين الشكل (7-17) ذلك. فإذا كانت R هي المسافة بين مركز نمط الحيود (000) الى نقطة الشبيكة المعكوسة (hkl) كما تقاس من اللوح الفوتوغرافي الموضوع على مسافة مؤثرة مقدارها L من البلورة التي تعمل الحيود او البلورات العمودية على اتجاه متجه الحزمة الساقطة ($X_o$) وعندها يكون :

نقاط الشبيكه المعكوسة

$1/\lambda$   K   S   $hkl$   $g_{hkl}$   $2\theta$   R

مصدر   $K_0$   بلوره   $K_0$   000

$\bar{h}\bar{k}\bar{l}$   كرة الانعكاس   مستوى التسجيل   L

**الشكل (7-17) مساقط شدة الحيز المعكوس على مستوى التسجيل (لوح التصوير) لاحظ العلاقة المبالغ فيها لكرة الانعكاس مع نقاط الشبيكة المعكوسة. ومن الناحية العملية فإن لكرة الانعكاس مقطع مستوي تقريباً.**

$$\frac{|g_{hkl}|}{\frac{1}{\lambda}} = \frac{R}{L} \quad \text{or} \quad R=\lambda L\,|g_{hkl}| \qquad ............. (23\text{-}7)$$

حيث يمثل $g_{hkl}$ متجه الشبيكة المعكوسة (reciprocal Lattice) ويكون عمودياً على Ko و S . أما الانحراف عن كرة الانعكاس فيهمل. يلاحظ من المعادلة (7-23) ان انصاف الاقطار المقاسة في نمط حيود الالكترونات تساوي ببساطة مقادير متجهات الشبيكة المعكوسة مضروبه في عامل التدريج. يمكن، من الشكل (7-17)، اعتبار أن نمط الحيود كمسقط لنقاط الشبيكةِ المعكوسة مسجلاً على اللوح الفوتوغرافي (مستوى التسجيل) . ان هيئة وتوزيع شدة نمط الحيود تعتمد على شكل البلوره ونوع البنيه البلوريه والتكوين الكيماوي.

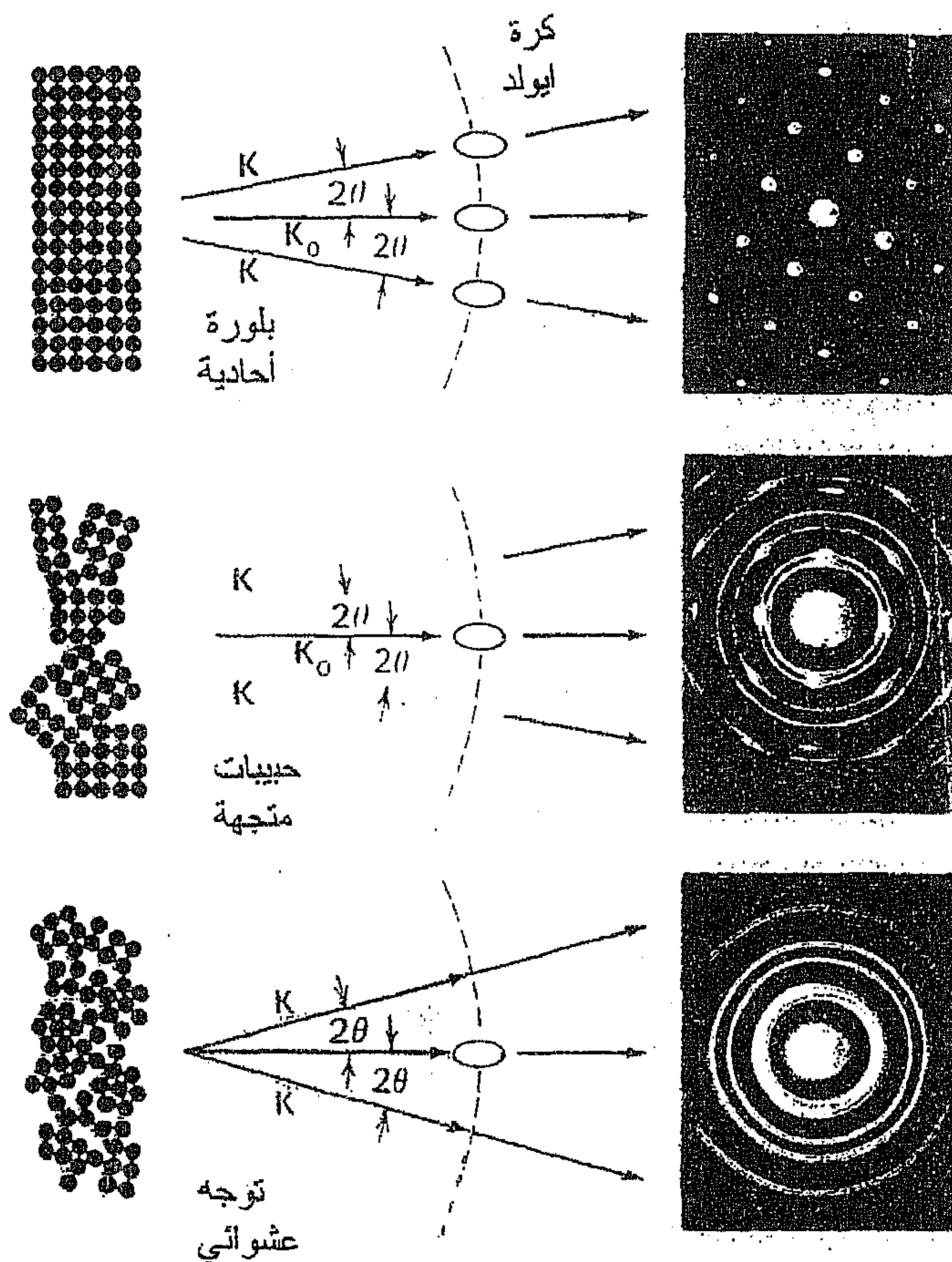
**جـ- انواع نمط حيود الالكترونات:**

يتعلق نوع وصفات حيود الالكترونات ، بلاشك،بأسلوب الحيود لكنه يعتمد بالدرجة الاساس على صفات النموذج اي بمعنى آخر على تكوينه الكيماوي وبنية بلورته وابعادها واتجاهها وتوزيع مختلف مكوناته او بلوراته المتعددة في منطقة الحيود.

يتميز حيود الالكترونات أساساً بهيئته النقطية اذا كانت منطقة الحيود متكونه من بلوره احاديه او مجموعه من بلورات بينهم فرق قليل في الاتجاه اي أن لها اتجاه عام واحد في حين تكون انماط الحيود على هيئه حلقات إذا كانت منطقة الحيود مكوّنه من مجاميع بلوريه عديده متجهة بشكل عشوائي بالنسبة لبعضها البعض، أما الدرجات المتفاوته من شدة (إضاءة) الحلقات او النقاط فيمكن ان تكون مؤشراً على مقدار عدم التطابق في الاتجاه او النمط النسبي للتجمعات البلوريه.

يبين الشكل (7-18) كيفية تكوين أنماط حيود الالكترونات وعلاقتها بصفات العيته المفحوصة. ومن الجدير بالذكر ان الشكل (7-18) يمثل حالاتٍ نموذجية.

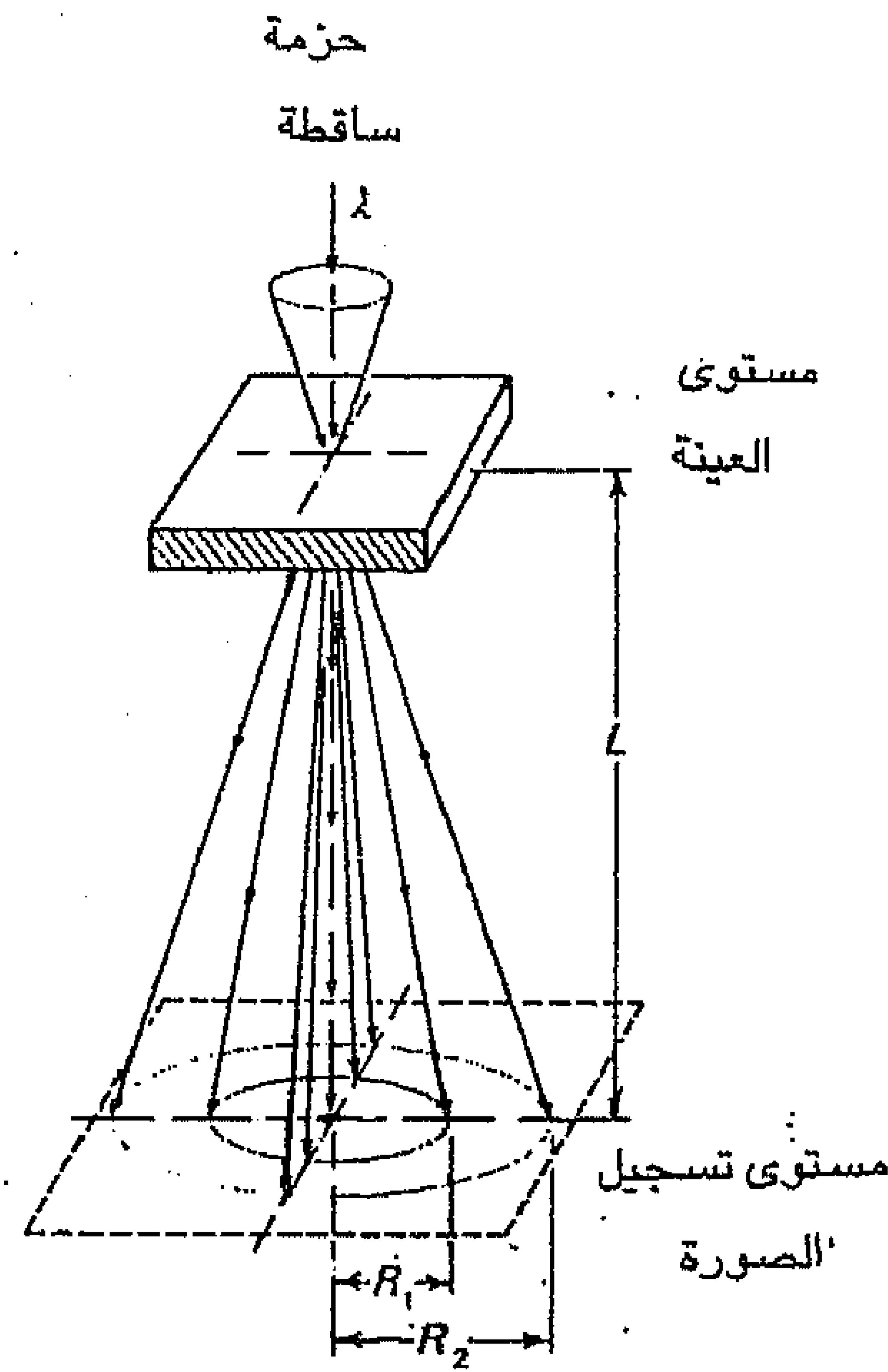
يمكن أن يمثل الشكل آنف الذكر أنماط حيود الالكترونات ذات الطاقة العالية اي كالذي يحدث عادة في المجهر الالكتروني النافذ حيث تكون العينه ذات مقطع خفيف جداً.




**الشكل (7-18) تاثير بنية النموذج على تكوين**

**أنماط الحيود لأغشية من الذهب.**

يلاحظ أن أنماط الحيود ذات النوع الحلقي تنشأ من مخاريط الحيود وذلك بتقاطع كرة الانعكاس بالصفوف المستمرة من نقاط الشبيكة المعكوسة (reciprocal lattice points) والتي تعتبر ككرات متحدة المركز في الفضاء العكسي(reciprocal space) لذلك يمكن وصف الحيود الناتج من التجمعات (المواد) المتعددة البلورات كصفوف من دوائر انعكاس منتظمة على اللوح الفوتوغرافي (لوح التصوير) كما مبين في شكل (7-19) في حالة الالكترونات النافذة.




**الشكل (7-19) الهندسة البسيطة لتكوين انماط حيود الالكترونات النافذة.**

يوضح الشكل (7-20) أنماط حيود حلقي من النوع النافذ لعدد من البنى البلورية المأخوذة لأغشية رقيقة ناتجه من تبخير المواد المشار إليها، يعين ترتيب الحلقات الناتجة وشداتها النسبية بوساطة معامل البنية الذري الذي سبق ان تمت الاشارة اليه (فصل حيود الاشعة السينية). يلاحظ من ذلك ان كل سطوح الانعكاس (hkl) ممكنة في حالة بنية المكعب البسيط. لذلك يتضمن نموذج حيود الالكترونات للمنغنيز (Mn) المتعدد البلورات (بنيته مكعب بسيط) كل سطوح الانعكاس {hkl}. مع زيادة انصاف اقطار الحلقات بزيادة قيم $g_{hkl}$ كما يستنتج من المعادلة (7-23).

**د- معايرة أنماط الحيود الالكتروني وقياس ثابت الكاميرا($\lambda L$):**

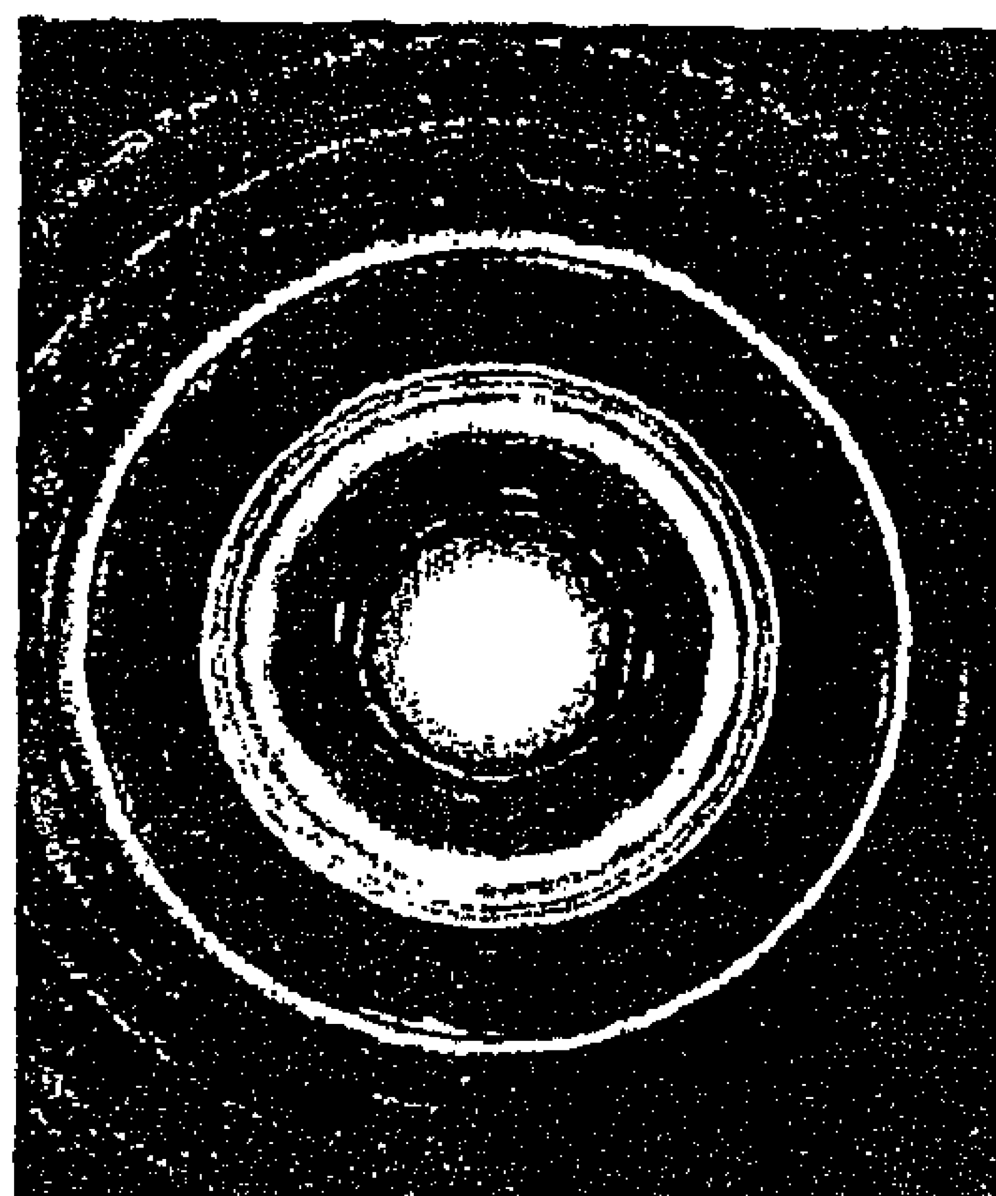
يمكن من المعادلة (7-23) ملاحظة ان بعد النقاط عن المركز او انصاف أقطار الحيود تتناسب مع مقدار متجه الشبيكة العكسية $|g_{hkl}|$ وأن ثابت الكاميرا($\lambda L$). يمكن تعيين ثابت الكاميرا إذا تأملنا الشكلين (7-19) و (7-20) اي أن :

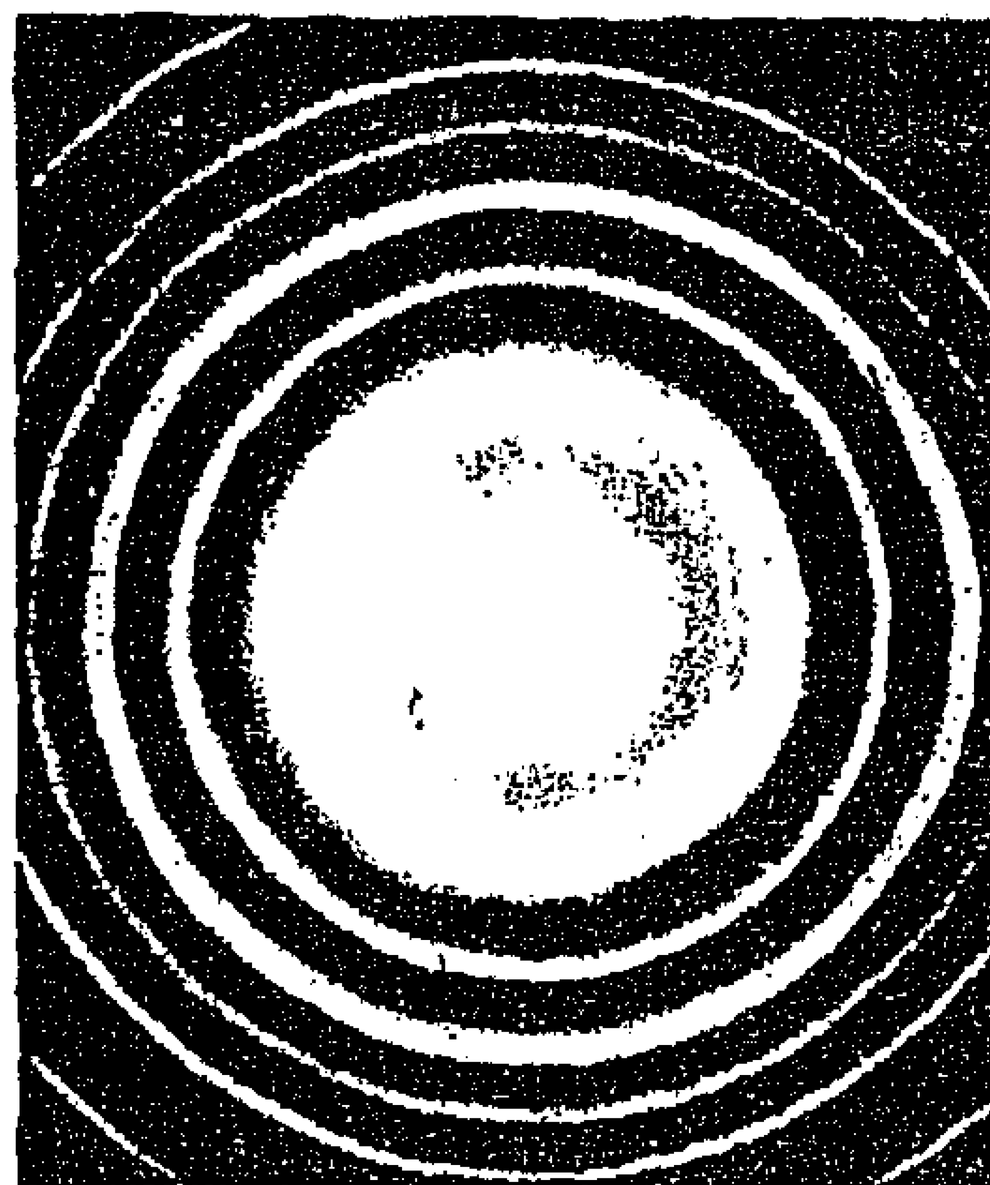
$$\lambda L = \frac{R}{|g_{hkl}|} = Rd_{hkl} \qquad \text{...............} \; (7\text{-}24)$$

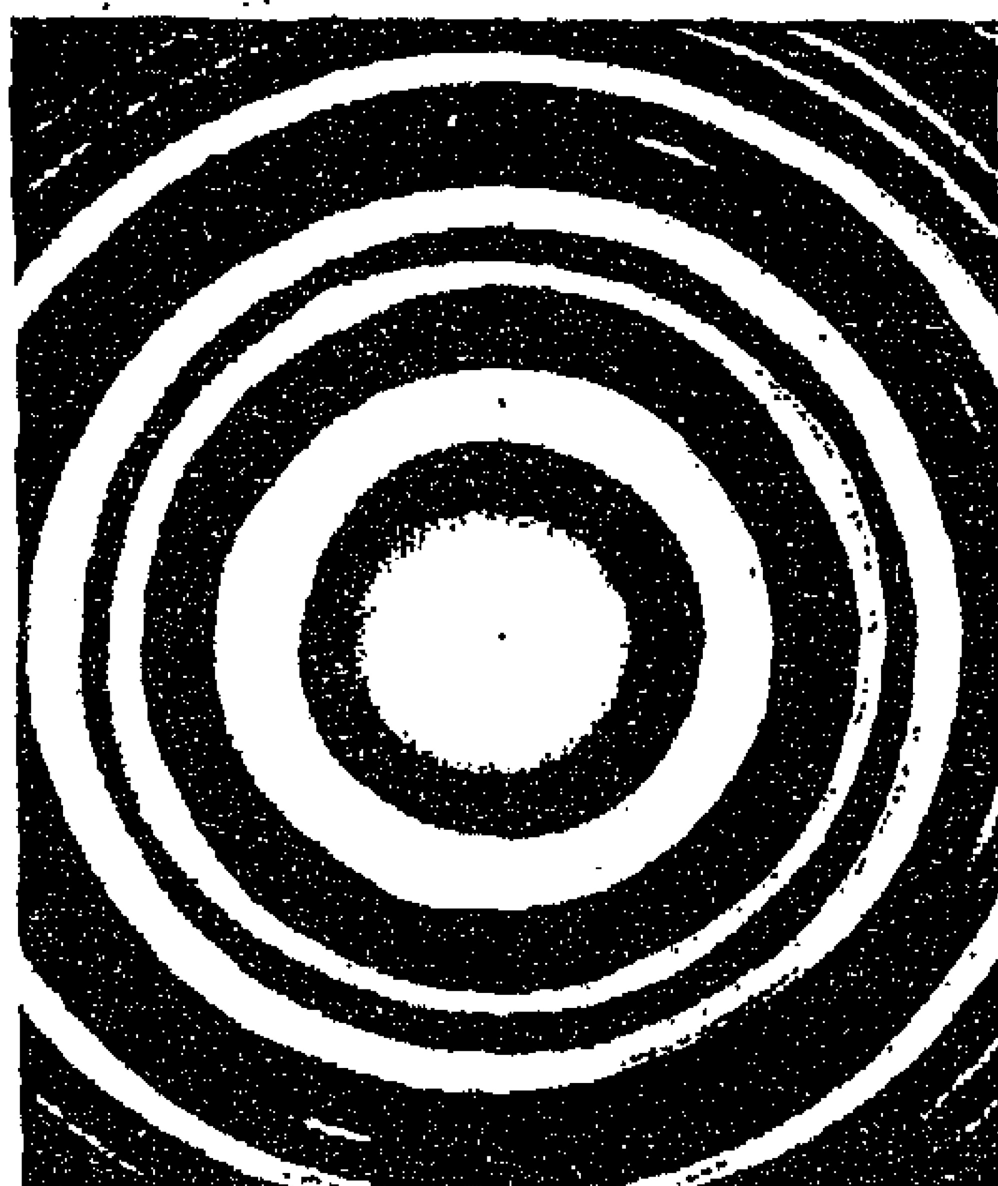
حيث تمثل $d_{hkl}$ المسافة بين المستويات الذرية في المادة البلورية لأي من مستويات الانعكاس المعينه {hkl} و R هو نصف قطر خط الحيود المعين . فلو تأملنا على سبيل المثال، بلوره المكعب فإنه بتعويض المعادلة (3-5) ($d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}}$) في معادلة (7-24) ينتج ان :

$$h^2 + k^2 + l^2 = \frac{a}{\lambda L} R \qquad \text{.........} \; (7\text{-}25)$$

حيث يمكن ملاحظة ان المعادلة اعلاه (7-25) على هيئة معادلة الخط المستقيم (y=mx) فيكون $y = \sqrt{h^2+k^2+l^2}$ والانحدار $m = \frac{a}{\lambda L}$ و R =x وكما مبين في


(a)

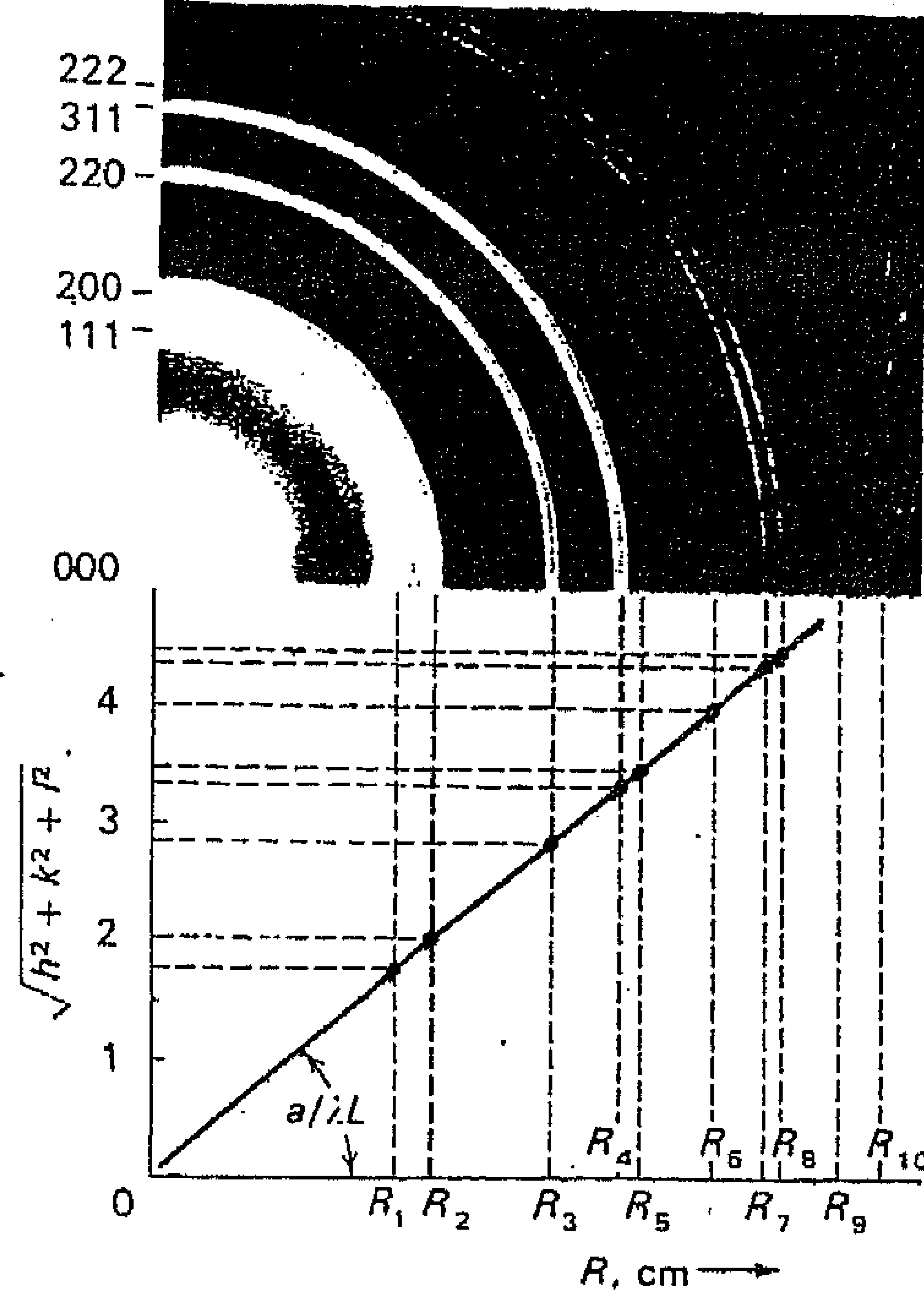

(b)


(c)


(d)

الشكل (7-20) أنماط حيود حلقية للإلكترونات النافذة من أغشية رقيقة متعددة البلورات (a) β-Mn مكعب بسيط (b) Fe(bcc) و (c) Rh(fcc) فيه اتجاه تفضيلي قليل (d) Er(hcp) أما النقاط الظاهرة فهي من بلورات مجاوره لها تكوين كيماوي وبنية بلوريه مختلفين عن العنصر الاساس Er .

الشكل (7-21) ،حيث يمكن تعيين ثابت الكاميرا بسهولة من الانحدار $m=\frac{a}{\lambda L}$ لأية مادة معلومه. يلاحظ من الشكل (7-21) ان قيم $\sqrt{h^2+k^2+l^2}$ والقيم المتعلقة بها لإنصاف أقطار حلقات الحيود عند المستويات الممكنة (hkl) تعتمد ، في حالة البنيه البلورية المكعبة، على كون المادة ذات بنيه مكعب متمركز الجسم (bcc) أم مكعب متمركز الوجه (fcc) وهكذا . وحيث ان نمط الحيود في الشكل (7-21) هو في الواقع لبنية المكعب المتمركز الوجه (Fcc) وهي قطعة رقيقة من النيكل وقد رسمت قيم $\sqrt{h^2+k^2+l^2}$ التي يمكن حساب قيمها حسب معيار معامل البنيه الذرية (atomic structure factor) او من جدول (7-3) الذي يحتوي على أدلة سطوح الانعكاس الممكنة {hkl} للبنى البلورية الشائعة ومن ثم يتم تعيين الحلقات الخاصة بالسطوح كما في الشكل (7-21) . يمكن ملاحظة ان علاقة خطيه يتم الحصول عليها لكل بنيه بلوريه وذلك بمقارنة المعادلة (7-24) مع معادلة الخط المستقيم (y=mx) حيث يكون $y=\frac{1}{d_{hkl}}$ و $m=\frac{1}{\lambda L}$ وأن $x=R$ تحسب المسافة بين سطوح الانعكاس ومن معرفة معلمات الشبيكة البلورية تتم معرفة نوع المادة او ثابت الكاميرا وتعرف البنيه البلوريه للمادة من شكل نمط حيود الالكترونات، فعلى سبيل المثال، يكون أسلوب ترتيب خطوط نمط الحيود الالكتروني لمادة متعددة البلورات صغيرة الحجم الحبيبي وذات بنيه (fcc) كالآتي خطين متقاربين يليهما خط منفرد بعيداً عنهما نسبياً ثم خطين فخط وهكذا، أما بالنسبة لبنية (bcc) فيكون نمط الحيود على شكل خطوط (حلقات) منفردة تبعد بابعاد متساوية عن بعضها تقريباً وهكذا فلكل بنية بلوريه نمط حيودها المميز. وبعبارة أخرى يمكن معرفة اي مجهول إذا علمت بقية العوامل الاخرى في المعادلتين (3-5) و (7-24) .




**الشكل (7-21) معايرة أنماط الحيود الالكتروني. ينتج خط مستقيم عند تقاطع قيم $h^2 + k^2 + l^2$ مع انصاف أقطار حلقات الحيود للنيكل (fcc). انحدار المستقيم يساوي ثابت الكاميرا، $\lambda L$.**

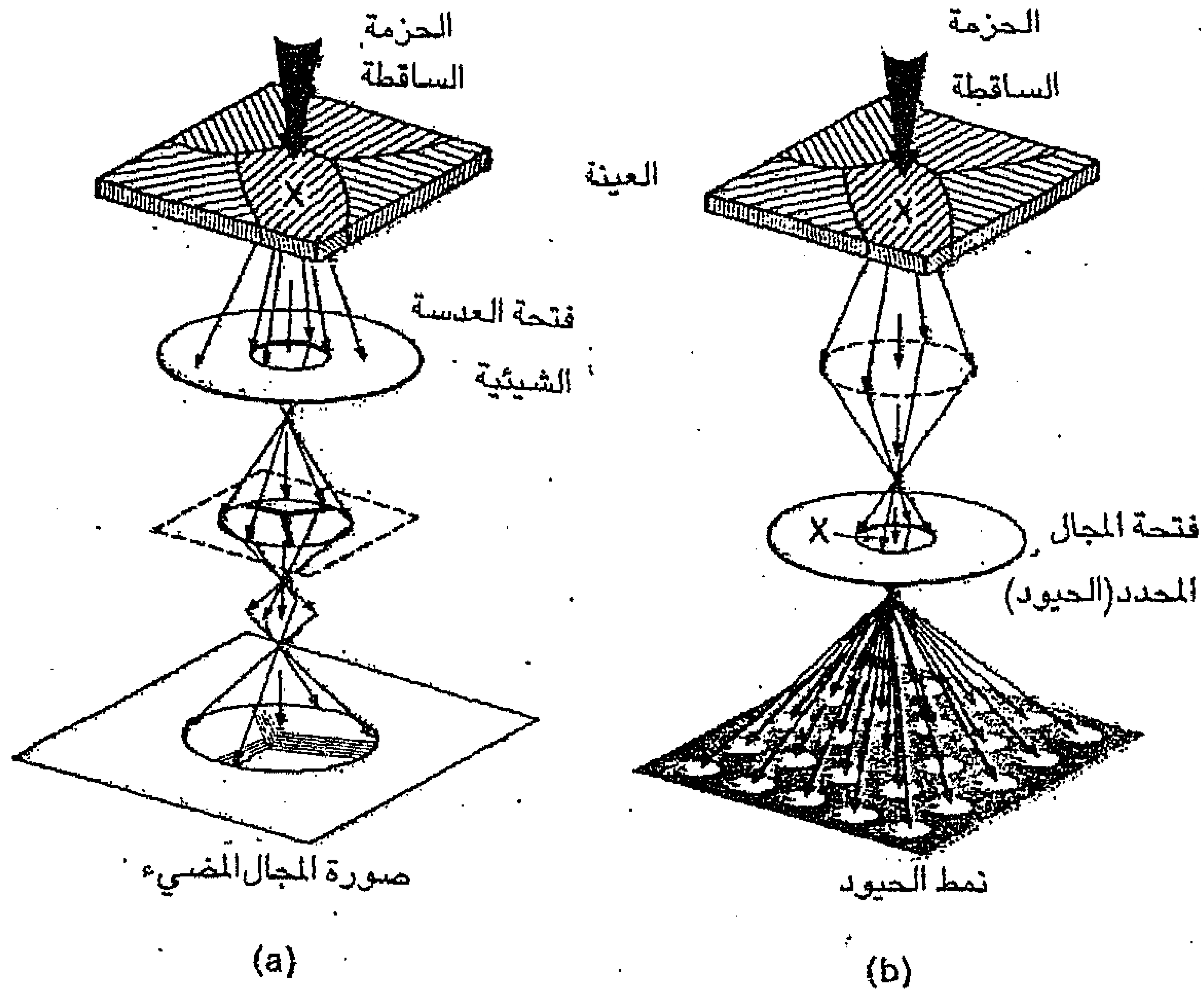
تتغير بالطبع قيمة ثابت الكاميرا ($\lambda L$) بتغيّر الفولتيه المعجلة او موضع العينه. وقد تمت الاشارة سابقاً الى علاقة $\lambda$ مع الفولتيه المعجلة في المعادلتين (7-7) و (7-9) . أما L فهي المسافة الحقيقية بين صورة نمط الحيود المتكونه على الحاجز (screen) ومكان العينه وفي حالة ثبوت مكان العينه تماماً بالنسبه للعدسه الشيئية، فإن L سيكون ثابتاً أيضاً. والواقع ان L تتغير قليلاً بسبب بعض تأثيرات التسخين او التبريد او تدوير او امالة العينه الى آخره.

جدول (3-7) الإنعكاسات {hkl} الممكنة لبنى البلورات bcc و Fccومكعب الماس (diamond cubic) و (hcp) . * سطوح لها قيم متكافئة من | g | .

| bcc{hkl} | fcc{hkl} | diamond{hkl} | hcp {hkl} | hcp {hkil} |
|---|---|---|---|---|
| 110 | 111 | 111 | 100 | $10\bar{1}0$ |
| 200 | 200 | 220 | 002 | 0002 |
| 211 | 220 | 311 | 101 | $10\bar{1}1$ |
| 220 | 311 | 400 | 102 | $10\bar{1}2$ |
| 310 | 222 | 331 | 110 | $11\bar{2}0$ |
| 222 | 400 | 422 | 103 | $10\bar{1}3$ |
| 321 | 331 | 511,333* | 200 | $20\bar{2}0$ |
| 400 | 420 | 440 | 112 | $11\bar{2}2$ |
| 411,330* | 422 | 531 | 201 | $20\bar{2}1$ |
| 420 | 511,333* | 620 | 004 | 0004 |
| 332 | 440 | 533 | 202 | $20\bar{2}2$ |
| 422 | 531 | 444 | 104 | $10\bar{1}2$ |
| 510,431* | 600,442* | 711,551* | 203 | $20\bar{2}3$ |
| 521 | 620 | 642 | 210 | $21\bar{3}0$ |
| 440 | 533 | 553 | 211 | $21\bar{3}1$ |

## هـ- تطبيقات وتفسير انماط الحيود الالكتروني من المناطق المختارة:

يتم الحصول على الحيود الإلكتروني من منطقة محدده (مختارة) من النموذج بإدخال فتحة ضوئية صغيرة هي التي تحدد المنطقة التي يحصل منها الحيود الالكتروني كما في الشكل (7-22) .




**الشكل (7-22) (a) صورة المجال المضيء (b) تكوّن نمط حيود من منطقة مختاره. تظهر بصورة خاصة نقطة التقاء الحدود البلورية ، ان نمط الحيود متولد في (b) عن المنطقة (المساحة)X للنموذج الرقيق.**

يعكس الحيود الالكتروني من المناطق المختارة السمات البلورية والكيماوية للعينه في تلك المنطقة حيث يمكن تعيينها بالصور المباشرة المأخوذة بالمجهر

الإلكتروني النافذ. تسمح تقنية المنطقة المختارة (selected area) ، من بين الميّزات الاخرى لها، بعزل الحزم الالكترونية ومن ثم ظهور (مشاهدة) معلومات الصوره الخاصة بتلك الحزم وعلى شكل صورة المجال المظلم (dark field image) اي أنه يمكن استخدام شعاع محاد واحد وتكوين صورة منه للمنطقة المختارة من العينه.

أما إذا أريد استخدام المجهر بالأسلوب المألوف، اي استخدام الاشعة النافذة فقط لتكوين الصوره حيث تستعمل الفتحة الضوئية عند العدسة الشيئية وبذلك تتكون صورة المجال المضيء (bright field image) للعينه اي ان فتحة العدسة الشيئية سوف تسمح للإلكترونات النافذة بتكوين الصوره وتمنع جميع الالكترونات المحادة من الاشتراك في تكوين الصوره. يمكن الرجوع الى الشكل (7-22) حيث يبين باختصار تقنية صوره المجال المضيء لعينه رقيقة بلوريه البنيه اضافة الى تقنية الحيود . تظهر المناطق التي يتم حيود الالكترونات عندها داكنه في صورة المجال المضيء، أما المناطق الاخرى فتظهر شفافة (مضيئة) على فرض ان سمك العينه متجانس.

ان قطر الفتحة الضوئية المحدده للمنطقة المراد أخذ الحيود عنها هو الذي يحدد أبعاد المنطقة المعينه التي يتم فيها الحيود ، وعندما يراد استخراج الحيود لمنطقة معينه يتم ادخال الفتحة الضوئية المحدده لمنطقة الحيود ثم تسحب الفتحة الضوئية للعدسه الشيئية ومن ثم يتم تصغير الصورة وذلك بتقليل التيار المار بالعدسة الوسطيه (intermediate lens) حتى يتم التحويل الى (الحصول على ) نمط الحيود. بهذه العملية يتم تبئير نمط حيود الالكترونات.

## و- التحليل الكيماوي وتحليل البنيه بواسطة الحيود الالكتروني من منطقة مختاره:

يمكن تحليل نمط الحيود الالكتروني لقياس البنيه البلوريه والتكوين الكيماوي اذا علمنا ان نمط الحيود يمثل مساقط الشبيكه البلوريه المعكوسة (reciprocal lat-tice) . فيمكن بناء (تصور) الشبيكة البلوريه الحقيقية اذا تم التأمل في الهيئات المكنة للشبيكة المعكوسة العائدة لها ومن ثم يمكن تحديد وحدة الخلية.ويمكن ايضاً من معرفتنا بترتيب الشبيكه البلورية ومناطق خمود الحيود ومن شدات الانعكاس لمختلف المستويات ، التنبؤ بصفات الترتيب الذري وأماكن الذرات في الخلية الأساسية اي التنبؤ بنوع البنيه البلوريه للعينه.

يجب ان يكون معلوم ان نمط الحيود يمثل مسقطاً واحداً للشبيكة المعكوسة. فإذا اريد اعادة بناء الشبيكة الحقيقية العائدة للشبيكة المعكوسة، فيلزم ذلك دراسة مسقطين او نمطي حيود مختلفين. يتوفر في اغلب المجاهر الالكترونية النافذة التجاريه أجهزة لإمالة العينه والحصول على أكثر من نمط حيود للعينه ولنفس المنطقة المحدده و ذلك تسهيلاً لدراستها بشكل كامل. ان تحليل البنيه يتضمن بالأساس دقه قياس عالية نسبياً كما ان فيها مقداراً من التجربة والخطأ (trial and error) عند المحاولة الواحدة لتحديد البنيه.

يمكن ايضاح كيفية استخدام حيود الالكترونات في تعيين البنيه بالرجوع الى الشكل (7-23) . يبين الشكل (7-23) (a) صورة لنمط حيود الكتروني لمنطقة مختارة لغشاء رقيق من عنصر (Er) متأكسداً قليلاً اي في اول مراحل التأكسد. وقد ظهر التحديد (indexing) الكامل لحلقات بعض الانعكاسات العائدة لغير بنية السداسي المتراص (hcp) . أما الشكل (b) فيبين النمط المحدد للعنصر بعدما تأكسد تماماً تقريباً وفي نفس منطقة الشكل (a) . يلاحظ بصوره واضحة ان الانعكاسات عائده لبنية المكعب المتمركز الجسم (bcc) وأن ثابت الشبيكة المحسوب هو

(a)

(b)

الشكل (23-7) تحليل البنيه البلوريه من حيود الالكترونات لتحول الاوكسـيد من Er الى $Er_2O_3$ (a) نمط الحيود للعنصر Er عند بداية التأكسد حيث تظهر عدة انعكاسات ضعيفة لبنية $Er_2O_3$ (bcc)، (b) نمط حيود $Er_2O_3$ يبين انعكاسات (bcc) ذو ثابت الشبكية البلوريه a=10.55A ،لاتزال ايضاً عدة انعكاسات باقية للعنصر (hcp)Er . الفولتيه المعجلة 100kV .

(10.55Å) وهذا يحدد ان البنيه مماثلة لبنية الاوكسيد ($Er_2 O_3$). لم يُظهر حيود الاشعة السينية لهذه المنطقة اية انعكاسات تشير الى وجود $Er_2O_3$ وهذا عائد بالدرجة الأساس الى أن الطول الموجي للأشعة السينية (بحدود 1.5 A بصورة عامة) أكبر بكثير من الطول الموجي للإلكترونات عالية الطاقة، اي ان الاشعة السينية لاتفي بشرط الحيود (قانون براك) هنا. وهذه ميزه أخرى لصالح حيود الالكترونات على حيود الاشعة السينية تضاف الى ميزة اختيار منطقة صغيرة جداً من العينة لأخذ الحيود الالكتروني عنها.

**٨-٥-٧ التباين الصوري في المجهر الالكتروني النافذ:**

يتم الحصول على التباين الصوري في المجهر الضوئي عادة اما بتباين الامتصاص او بالتباين الطوري. وبالتشابه يمكن الحصول على التباين في المجهر الالكترونياما بإزالة (ازاحة) الالكترونات من الحزمة وبزاوية استطاره كبيره عند مرورها خلال العينه او بتغيير طور الموجه بمقادير مختلفة عبر جبهة الموجه كنتيجة للإستطاره ذات الزاوية الصغيرة. وهناك نوع آخر من التباين يمكن ان يوجد في حالة المواد البلورية وهو تباين الحيود. ينشأ التباين الاخير لان العيوب والماهيات الصغيرة ذات العلاقة في البنيه يمكنها ان تسبب تغييرات موضعيه في شدات الحزم الحاده والنافذة اما تفاصيل انواع التباين فهي:

**أ- تباين الامتصاص والتباين الطوري:**

لتباين الامتصاص علاقة بالتباين الطوري لان كل منهما ينشأ عن الاستطاره المرنه للإلكترونات في العينه *. واي من التباينين يشارك بصوره أكبر في مجموع

* تتفاعل الحزمة الإلكترونية مع العينه بأسلوبين مختلفين ، فالإلكترونات السريعة تُستطار اما بصوره مرنة وهي الحالة التي لاتفقد فيها الالكترونات جزء من طاقتها خلال عملية الاستطارة او بصوره غير مرنه حيث يمتلك الالكترون المستطار طاقة اقل مما كان يملك قبل الاستطارة وتصبح العينه او بالأحرى ذره واحدة فيها بحالة تهيج.

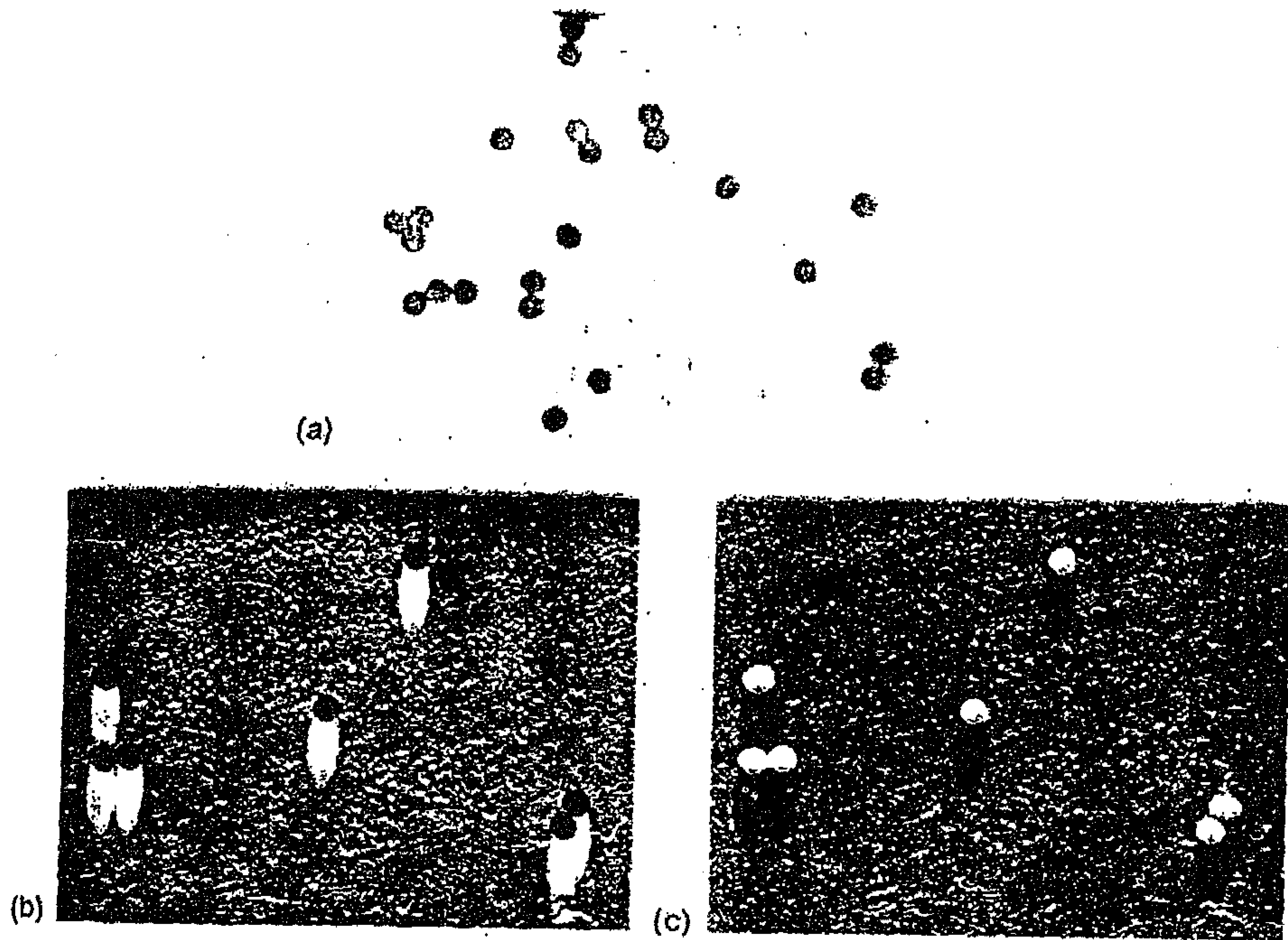
التباين يعتمد على كل من نوعية العينه والظروف التشغيليه للمجهر كقطر الفتحة الضوئية ومقدار عدم التبئر للعدسه الشيئية . ومع انه من المفروض ان يعامل كلا التباينين كحالة واحدة، لكنه من الناحية العملية فإنهما يعتبران تباينين منفصلين الى حدٍ ما.

١- تباين الامتصاص: يعتمد هذا النوع من التباين على الحقيقة القائلةان الاستطارة (Scattering) المرنه وغير المرنه للإلكترونات السريعة تزداد بزيادة العدد الذري (atomic number) للمادة التي تحدث عملية الاستطارة فيها، وحيث يكون الاعتماد الزاوي لمثل هذه الاستطارة متساوي تقريباً لكل الذرات، فالذرات الثقيلة ستستطير الكترونات اكثر خارج مدى الزوايا المسموح بها من قبل الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية مما تحدثه الذرات الخفيفه. لذلك ستستنزف الاجزاء السميكة من العينه او تلك المتكونه من عناصر ذات عدد ذري عالي، الحزمة الالكترونية النافذة اكثر ونتيجة لذلك ستظهر أكثر عتمة من المناطق الاخرى في الصوره الناتجة.

يعتمد مقدار هذا النوع من التباين الذي يمكن الحصول عليه على الفرق في قدرة الامتصاص (اي الاستطارة) للمناطق المتجاوره في العينه. ويحدد بالدرجة الاساس بالأعداد الذرية للمواد الموجودة فعلاً في العينه وعلى مقدار سمكها. يمكن زيادة هذا النوع من التباين في العينه المتكونه من مواد ذات اعداد ذريه متشابهة بإضافة مادة تعمل استطارة قوية الى أجزاء من العينه دون أخرى. تستخدم مثل هذه التقنيه في حالة تظليل العينه بزاوية معينه كما في حالة زيادة تباين الطبعة الكاربونيه (car-bon replica)، كما في الشكل (7-24) .

٢- التباين الطوري Phase contrast : يحدث تباين الامتصاص بسبب استطارة الالكترونات خارج الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية ، وبما أن معظم الاستطارة

المرنه تحصل عند زوايا صغيرة لذا تدخل معظم الالكترونات المستطارة خلال الفتحة الضوئية هذه . وحيث ان هذه الالكترونات تعاني تغيراً في طور الموجه المغادرةللسطح الاسفل من العينه بدلاً من التغيير في السعة الحقيقية لها. فشدة الموجه ستكون متساوية في جميع المناطق ومن ثم فالتصوير المباشر للعينه لايُحدث (لايكوّن) تبايناً.

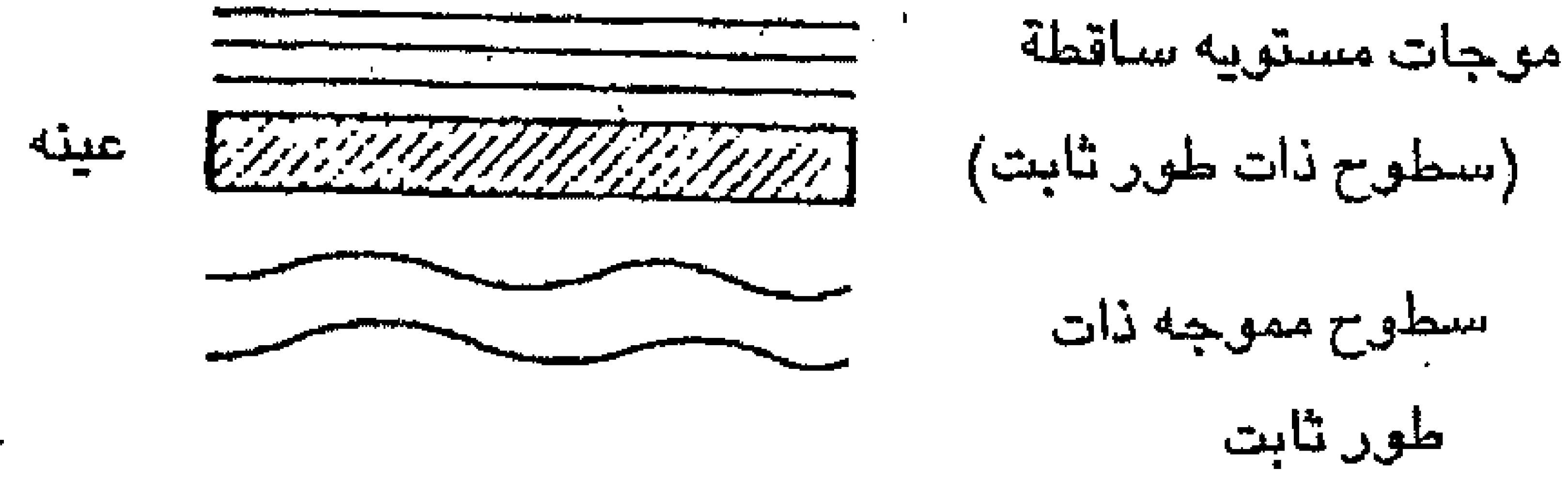



**الشكل (7-24) صورة بالمجهر الالكتروني لكريات اللاتكس (latex) 0.3µm على غشاء من الكاربون (a) كما حضّر، تبدو الكريات كأنها اقراص ولم يظهر أثر لبنية الغشاء الكاربوني (b) صورة لنفس النموذج السابق لكنه مظلل يظهر بوضوح تعزيز تباين الكريات وكذلك تباين سطح غشاء الكاربون (c) تبدو طبعة الحالة (b) مع تباين معكوس حيث تبدو مناطق الظل سوداء و تتعزز ظاهرة الابعاد الثلاثة (التجسيم).**

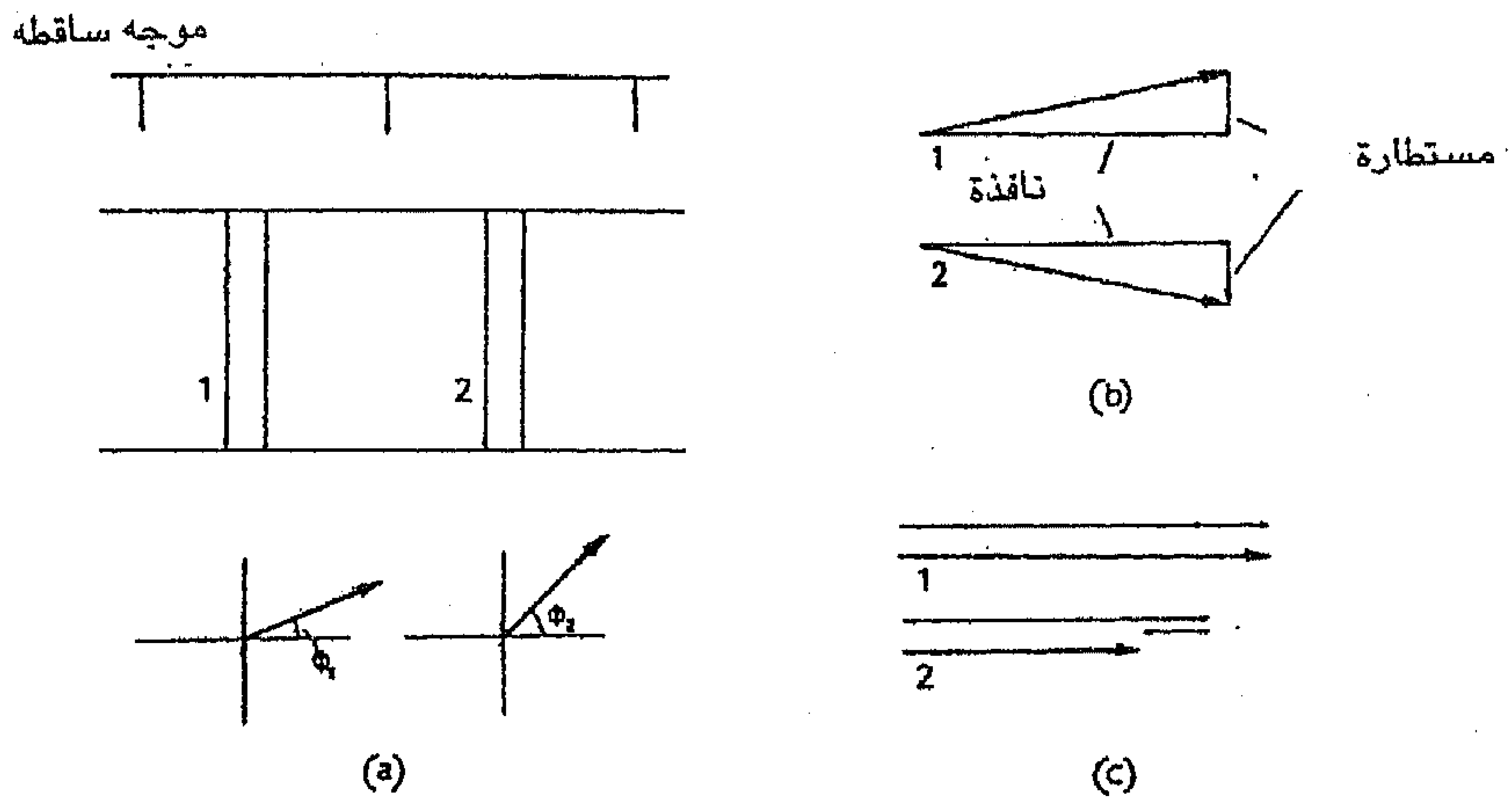
يكون تأثير التباين الطوري مهم عند محاولة تمييز تفاصيل ماهيات في صوره ابعادها أصغر او تساوي 10 الى 15Å. وينخفض تأثير التباين الطوري بشكل تدريجي ثابت فوق حد التمييز هذا . ولأجل ان يكون دور التباين الطوري فاعلاً يجب ان يمر كل او بعض من الالكترونات المستطاره خلال فتحة العدسه الشيئية ومن ثم تتحد ثانية مع الالكترونات غير المستطارة لتكوين الاختلافات في الشدة من نقطة الى أخرى في الصورة.

ولو فرضنا أن حزمة من الالكترونات المتوازية والتي لها نفس الطول الموجي ونفس الطور سقطت على نموذج رقيق جداً (أقل من 30Å). فإن اغلب هذه الالكترونات سينفذ خلال النموذج إلا أن قسم منها سيمر قريباً جداً من الذرات وينحرف بزاوية تعتمد على كل من العدد الذري وعلى مقدار مسافة الاقتراب. تخرج الالكترونات من النموذج بسعة منتظمة الا أن لها أطوار مختلفة عند السطح المستوي ، وذلك بسبب الفروق في الطور المتولده عن عمليات الاستطاره هذه ، اي ان هناك سطح متعرج للطور الثابت كما في شكل (7-25) .

ولتقدير الانحرافات في الطور المتولدة من مرور الالكترونات خلال النموذج. فلنتصور ان شريحة رقيقه من مادة النموذج عمودية على الحزمة الالكترونية الساقطة كما في الشكل (7-26) فتكون الموجه المستويه (التي لها طور وسعة phase and amplitude") ثابتين ساقطة على الشريحة الرقيقة (النموذج) فمعدل الجهد في العمود رقم (1) يختلف عن الجهد في العمود رقم (2) ومع ان الموجه الخارجه من السطح الأسفل للنموذج تمتلك نفس السعة في كل جزء منها إلا أن لها طور مختلف فلها الطور $\Phi_1$ تحت العمود 1 والطور $\Phi_2$ عند العمود 2 ، وقد تم توضيح ذلك في مخطط الطور المرسوم في (a) أسفل الطبقة السطحية. يمكن ان يعتبر مجموع الموجه هو الموجه النافذة متحدة مع موجات مستطاره ضعيفة نسبياً والتي تكون اطوارها مختلفة عن طور الموجه النافذة بمقدار $\frac{\pi}{2}$ . وكلما تغيّرت سعة مركبة




الشكل (7-25) رسم تخطيطي يبين كيفية نشوء الفروق في الطور عند اختراق نموذج رقيق.




الشكل (7-26) موجه مستويه (ذات سعة وطور ثابتين) ساقطة على طبقة رقيقة.

الموجه المستطارة يتغير تبعاً لذلك طور الموجه الكلية، كما في الشكل (b) . ان تغير طور المركبة المستطارة بمقدار $\pi (n+\frac{1}{2})$ ، n هو عدد صحيح، يؤدي الى تغيّر في السعة ومن ثم تغيّر في الشدة. لأن الشدة (I)تتناسب طردياً مع مربع السعة (A) اي ان $I \alpha A^2$، (الشكل c).

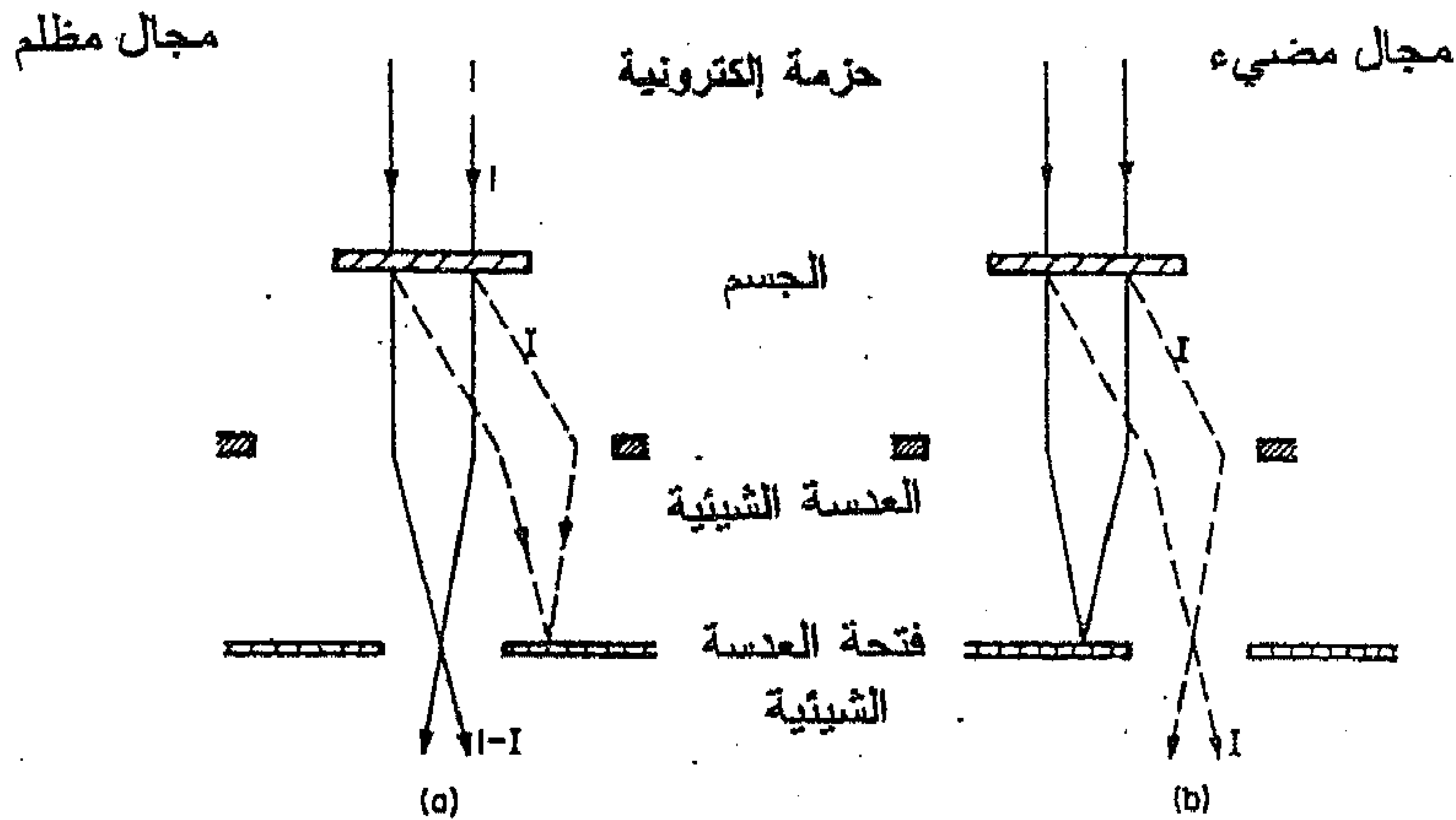
ب- تباين الحيود Diffraction contrast :

هناك عدة أنواع من البنى البلوريه للمواد الصلبة لاتظهر تبايناً عالياً باستخدام الطريقتين آنفتي الذكر (التباين الطوري وتباين الامتصاص) . فلا تبدي الانخلاعات، على سبيل المثال، تباين امتصاصي، بينما يمكن للانخلاعات ان ترى اذا امكن تمييز مستويات الشبكة البلورية، حيث يتطلب ذلك نموذجاً رقيقاً بحيث ان معظم الانخلاعات الموجودة اصلاً تنزلق خارجة من النموذج خلال سطحه. ان مثل هذه العيوب (الانخلاعات) مع ذلك، يمكن ان يتم اظهارها في العينات السميكة نسبياً باستخدام حقيقة كون هذه العيوب تشوه مستويات الشبكة البلوريه موضعياً ومن ثم تغيّر الشدة التي تحيد بها هذه المستويات الموجه الالكترونية الساقطة.

يتم هذا التباين بالسماح للحزمة الالكترونية النافذة او احدى الحزم الحادة للمرور خلال الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية ومن ثم لتكوّن الصوره. ولو فرضنا ان هناك منطقة في العينه تكون فيها مستويات الشبكة البلوريه منحنية (معوّجة) وبذلك تزداد الشدة الحاده موضعياً (عند تحقق قانون براك) وستظهر المنطقة المشوهه موضعياً من العينه في الصورة المتكونة باستخدام الشعاع الحاد مضيئة مقارنة مع المساحات المجاوره. والعكس صحيح، عند استخدام الحزمة النافذة، حيث ان الحزمة النافذة سوف تفقد موضعياً الكترونات اكثر بسبب الحيود وستظهر تلك المنطقة مظلمة في ارضية مضيئة (صورة المجال المضيء). ان عرض صورة العيب المتكون بهذا الاسلوب يعتمد على مقدار تشويه تلك المنطقة في النموذج ويقدر

كشيء نموذجي بحوالي 10nm . لذلك لا يشترط ان تكون قدرة تمييز الجهاز المطلوبه عالية جداً ومن ثم يمكن فحص عينات سمكها عدة مئات من النانوميترات وبنجاح.

ومما تقدم يفهم ان هناك نوعين من الصور، كما سبق التنويه عنه بصوره مختصرة فعند السماح للحزمة الالكترونية النافذة فقط بالمرور من الفتحة الضوئية للعدسه الشيئية فعندها تسمى الصوره صورة المجال المضيء حيث تظهر فيها الدقائق المترسبة والعيوب على المستوى الذري (أمثال الانخلاعات وغيرها) أو حتى الحبيبات وأشباه الحبيبات (subgranis) (إذا كانت بالإتجاه الصحيح) مظلمة وبقية المناطق مضيئة . أما عند السماح لأحد الحزم الالكترونية المحاده بالمرور خلال الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية فستظهر المناطق او العيوب التي سببت حيود تلك الحزمة مضيئة وبقية المناطق مظلمة لذلك تسمى صور المجال المظلم اي ان كل المناطق تبدو مظلمة عدا التي يكون ذلك الشعاع المحاد منها، الشكل (7-27) .




**الشكل (7-27) مخططاً الأشعة يوضحان (a) صورة المجال المضيء و (b) صورة المجال المظلم في المجهر الالكتروني. يتكون نمط الحيود في مستوي الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية ففي حالة صورة المجال المضيء تمنع الفتحة الضوئية الاشعة المحادة من الاشتراك في تكوين الصوره.**

وهناك عدة انواع من تباين الحيود الى جانب ماتم ذكره وهي تباين الاهداب من الحدود البلوريه والعيوب...ويمكن تمييز الآتي منها:

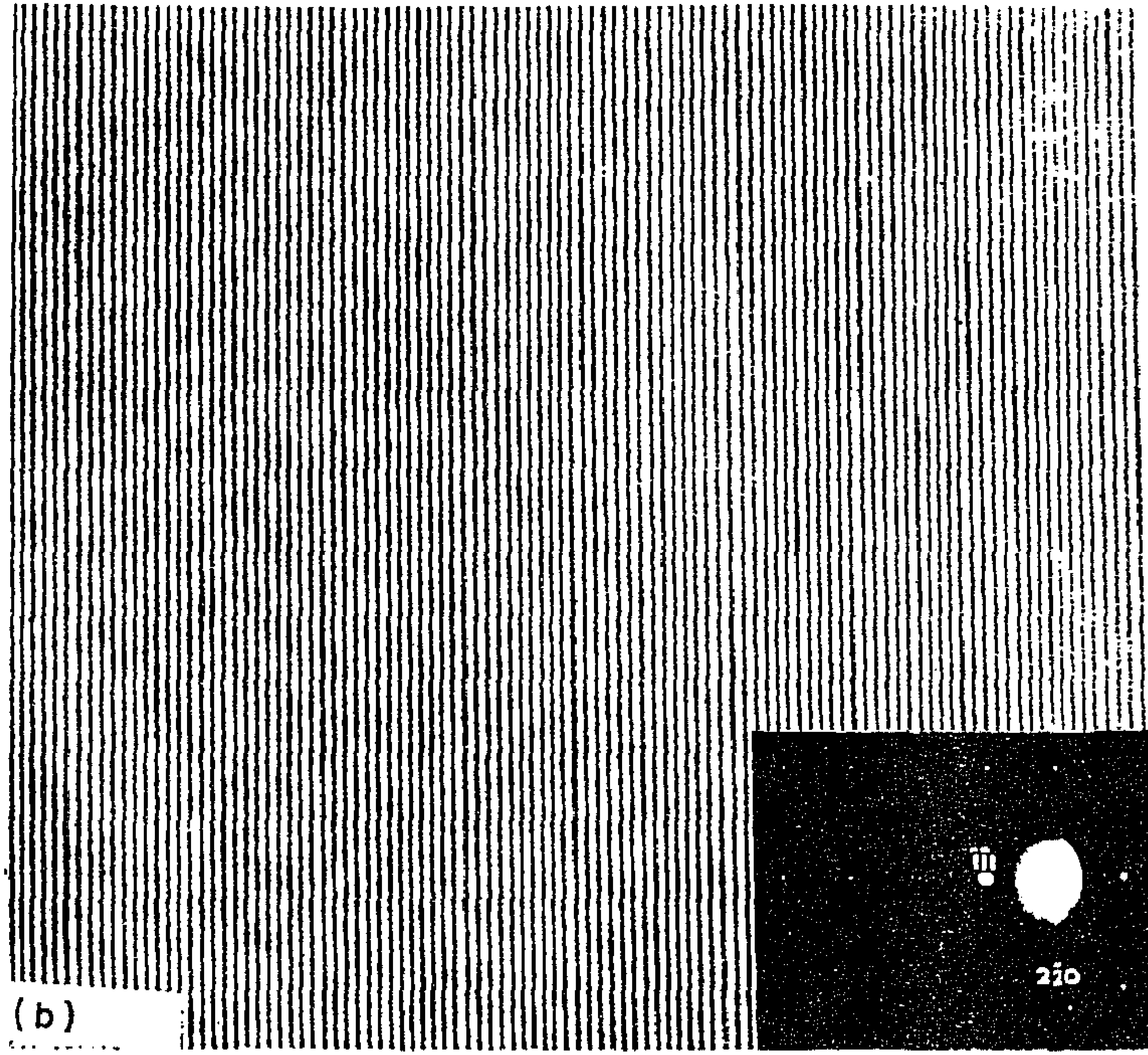
١- تمييز مستويات الشبكة البلوريه (صورة حزمتين او ثلاث حزم). لتمييز مستويات الشبكة البلورية للنموذج يتم السماح لواحده او اثنتين من الحزم المحاده إضافة الى الحزمة الأساسية النافذة لتكوين الصورة.

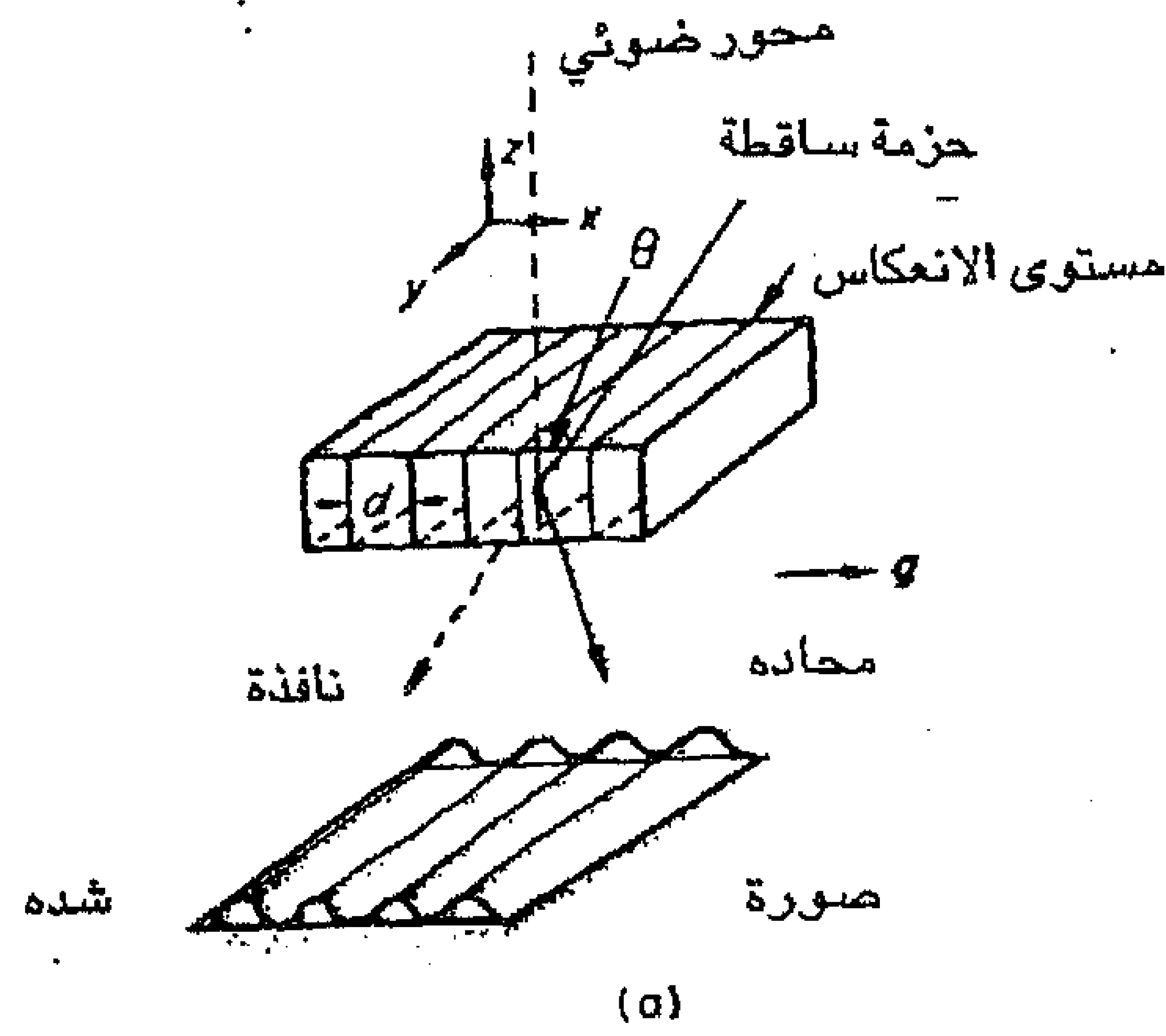
تتولد صورة اهداب متعاقبة كنتيجة للتداخل الطوري بين هذه الحزم. و تحت ظروف معينه تكون المسافات بين الاهداب (fringes) في الصوره متعلقة بالمسافة بين مستويات الانعكاس الذرية التي تولد الحزمة المحادة المتحدة مع الحزمة النافذة لتكوين الصوره.

ان أبسط نوع من هذه الاهداب هي تلك المعروفة بأهداب الشبكة البلورية والتي يتم الحصول عليها من بلورة مداره قريباً من اتجاه الانعكاس (reflecting oreinta-tion) عندما تكون فتحة العدسة الشيئية موضوعه بشكل يسمح لكل من الحزمة النافذة مباشرة والحزمة المحادة لتمر منها وتكوّن الصورة كما في الشكل (7-28) . وحيث ان هذه الأهداب لاتُرى الا عندما تكون العينه خفيفة جداً، فيمكن في هذه الحالة اهمال الامتصاص.

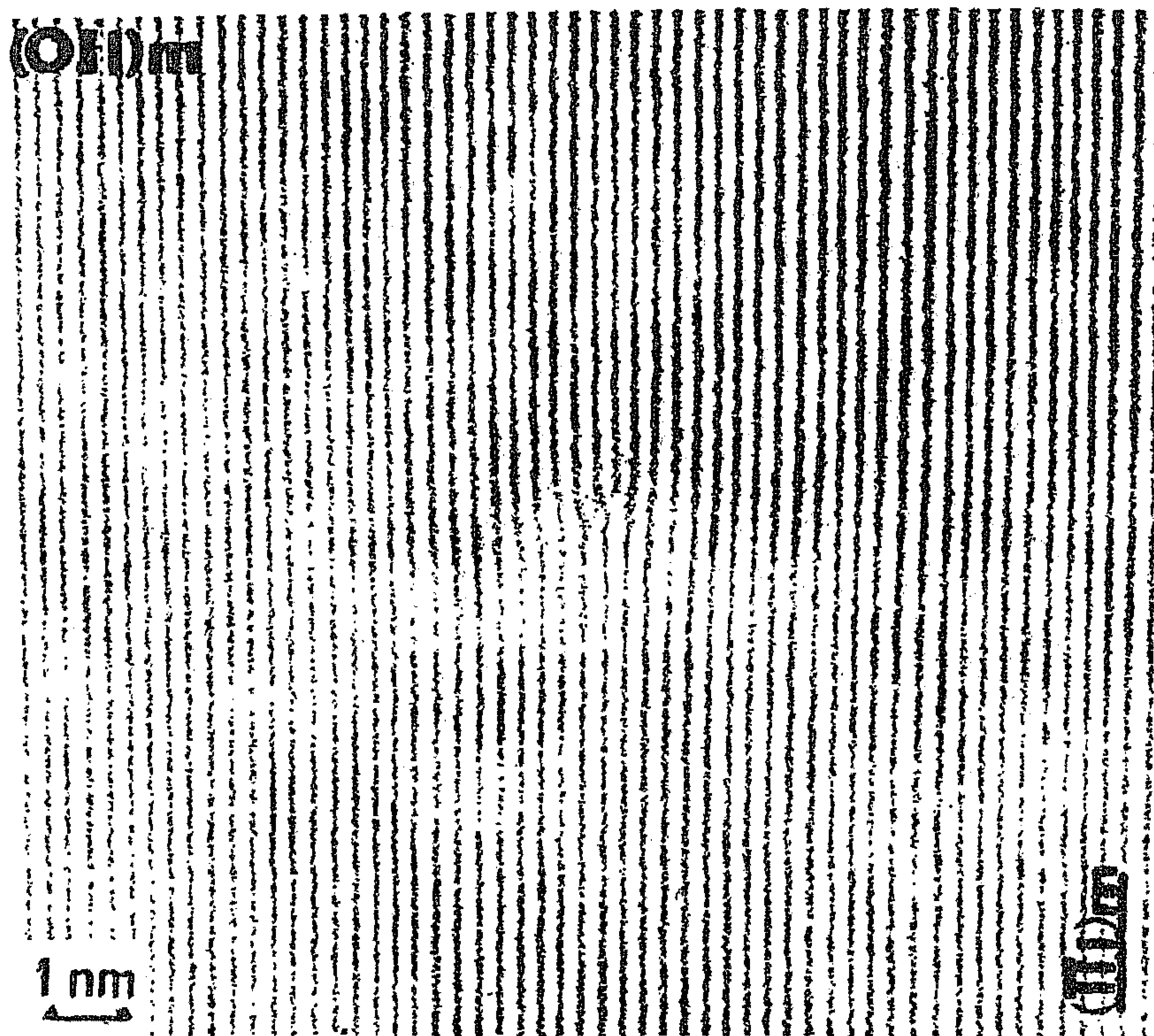
أما إذا تضمنت البلوره عيوب ، على سبيل المثال انخلاعه طرفيه (edge dis-location) والتي يغير وجودها الانتظام الموجود في المستويات الذرية للبلوره، فهذه الانخلاعه ستظهر في الاهداب ايضاً الشكل (7-29) .

لذلك فالحصول على هذه الاهداب يشير غالباً الى القدرة على تمييز المستويات الذرية للشبكة البلوريه، مع أن الاهداب ليست، بشكل عام ، متطابقة مع حافات مستويات الحيود.



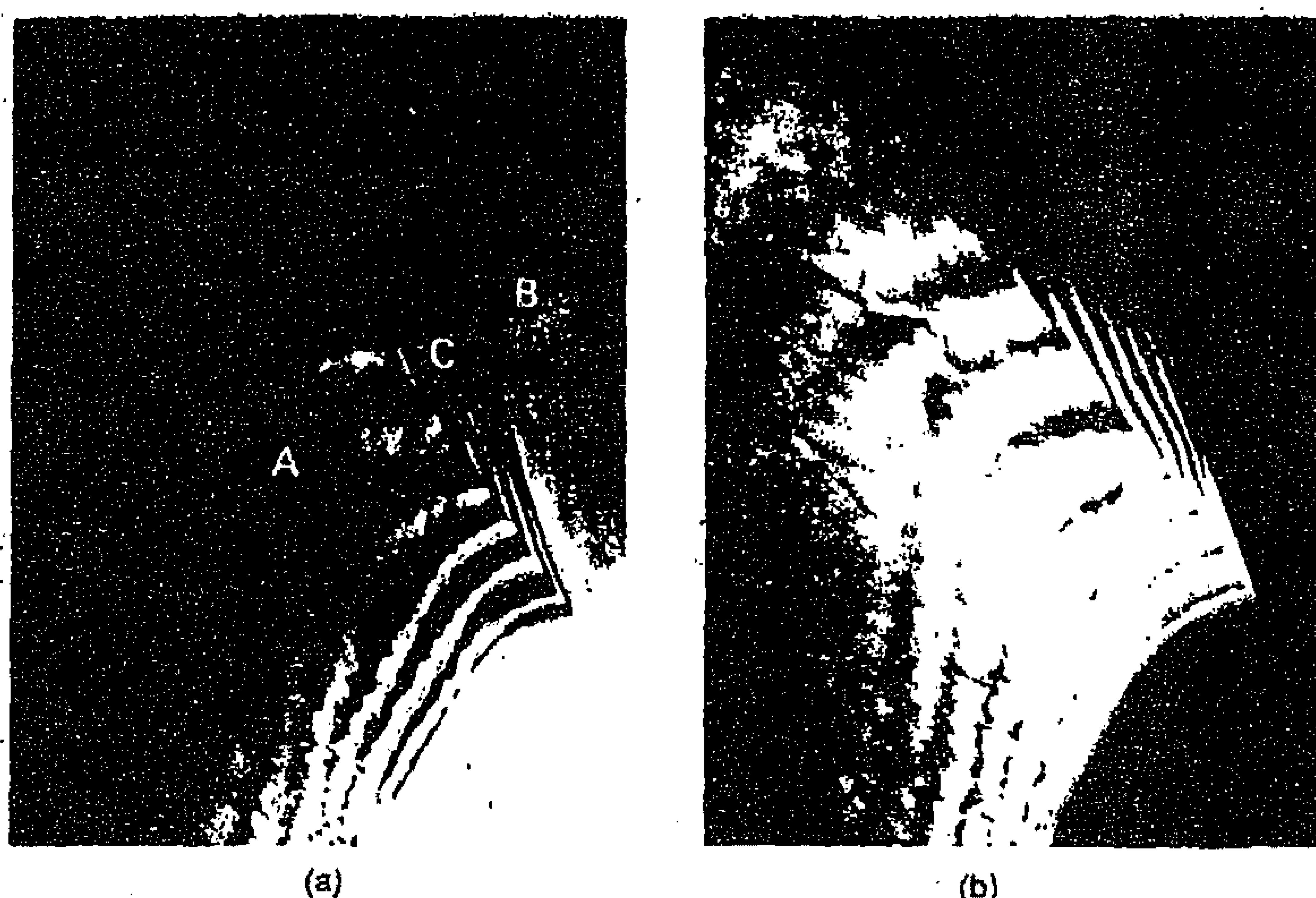




**الشـكل (7-28) في (a) رسم تخطيطي يوضح الشدة في الصوره بموازاة مستويات الانعكاس عند اتحاد كل من الحزمة النافذة والحزمة المحادة لتكوين الصوره. (b) صوره للمستويات الذريه (111) في بلورة السليكون ، المسافة بين الاهداب $3.138\mathring{A}$ ، عند استخدام الاضاءة المائلة.**




الشكل (7-29) صورة المستويات الذريه (111) لشبيكة بلورة السليكون وتظهر فيها انخلاعه طرفيه. متجه بيرجرس (b) لها هو $\frac{1}{2}[10\bar{1}]$ أو $\frac{1}{2}[110]$ .

٢- اهداب الحدود البلورية، تتولد اهداب بطريقة مشابهة لما تمت الاشارة اليه اعلاه بسبب تواجد مختلف العيوب او الحدود. فبالنسبة لاهداب الحدود البلوريه، وعندما يكون الحد البلوري مائلاً واحدى البلورتين عند اتجاه الانعكاس المضبوط (حسب معادلة براك) فإن الالكترونات المارة يتم تمثيلها باتحاد موجتين ومن ثم حدوث تداخل بينهما وتكوين الاهداب ، الشكل (7-30) . ويحدث الشيء نفسه عند حافة العينه او عند وجود اشباه الحدود بين اشباه الحبيبات.

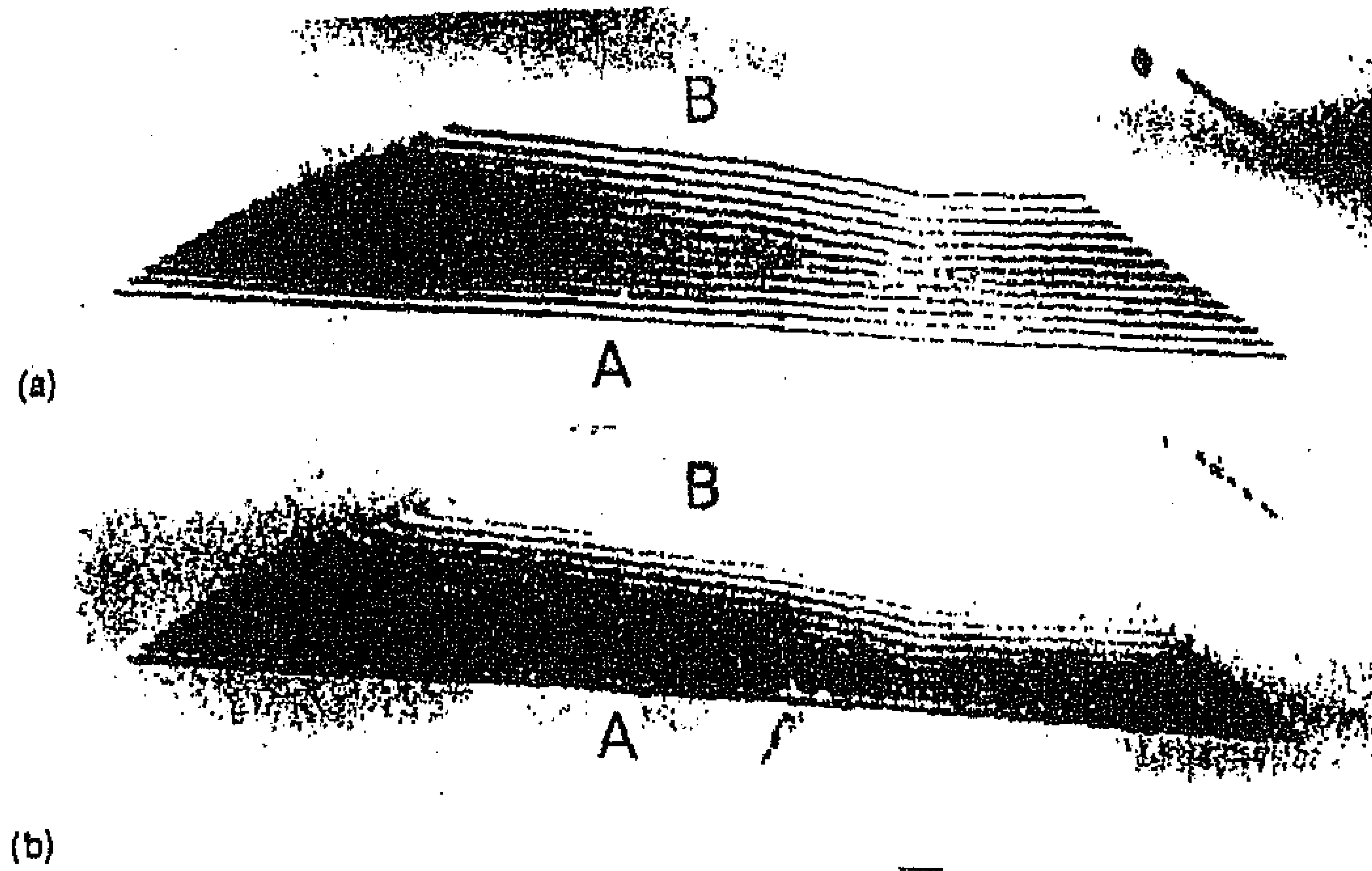



**الشكل (7-30) (a) صورة المجال المضيء لرقاقه بشكل اسفين (wedge - shaped) تحتوي على حد بلوري. حدثت اهداب السمك في الحبيبة A والتي هي قريبة من اتجاه الانعكاس، وهي تتوافق مع الاهداب عند الحد البلوري في C (b) هي صورة المجال المظلم لنفس المنطقة في (a) تبدو الحبيبة B سوداء لتعني انها لم تعمل حيود.**

٣- أهداب خلل النسق (Stacking fault fringes)، عندما تحتوي البلورة على خلل في نسق تراكم المستويات البلورية فإن الشبيكة تنزاح على أحد جانبي الخلل بمقدار ثابت نسبة الى الشبيكة على الجانب الآخر، بحيث ان اتجاه البلوره على اي من جانبي الخلل يبقى على حاله. يتواجد خلل النسق في المستويات البلوريه ذات

الادلة المنخفضة (Low - indices) ولذلك فهو خلل سطحي مالم تتضمن المستويات عيوب اخرى كالانخلاعات الجزئية. فعلى سبيل المثال، فإن خلل النسق في المعادن ذات بنية المكعب المتمركز الوجه (fcc) كالنحاس او الفضة يحدث عندما يكون نسق تراكم المستويات البلورية فيها غير صحيح (يكون تراكم المستويات الاكثر تراصاً (111) في بنية هذه البلورات على الاسلوب الموصوف في كتب علم البلورات وهو ABCABCABC) . يمكن ان ينشأ مثل هذا الخلل، اذا كان موضعياً، عند ازالة او زيادة أحد المستويات الذرية، كما يحدث عند تجمع الفراغات (vacancies) او الذرات البينيه على او بين المستويات الاكثر تراصاً. فإذا ازيل المستوى B ، في الوسط، من النسق آنف الذكر فيصبح النسق ذو خلل حيث يكون كالآتي AB¦CACA¦BC اي تكون منطقة الخلل هي سداسي متراص (hcp) (لأن نسق مستوياته هو CACACA) والمناطق المجاوره لها مكعب متمركز الوجه (fcc) .

يمكن مشاهدة مثل هذا الخلل، الذي يميل عن مستوى العينه، في المجهر في كل من صورتي المجال المضيء والمجال المظلم وباستخدام انعكاس براك الملائم. يظهر الخلل بتباين يتألق من أهداب موازية لخطوط تقاطع هذا الخلل مع سطحي النموذج. يبدو خلل النسق في صورة المجهر الالكتروني وباسلوبي المجال المضيء والمجال المظلم كما في الشكل (7-31) .



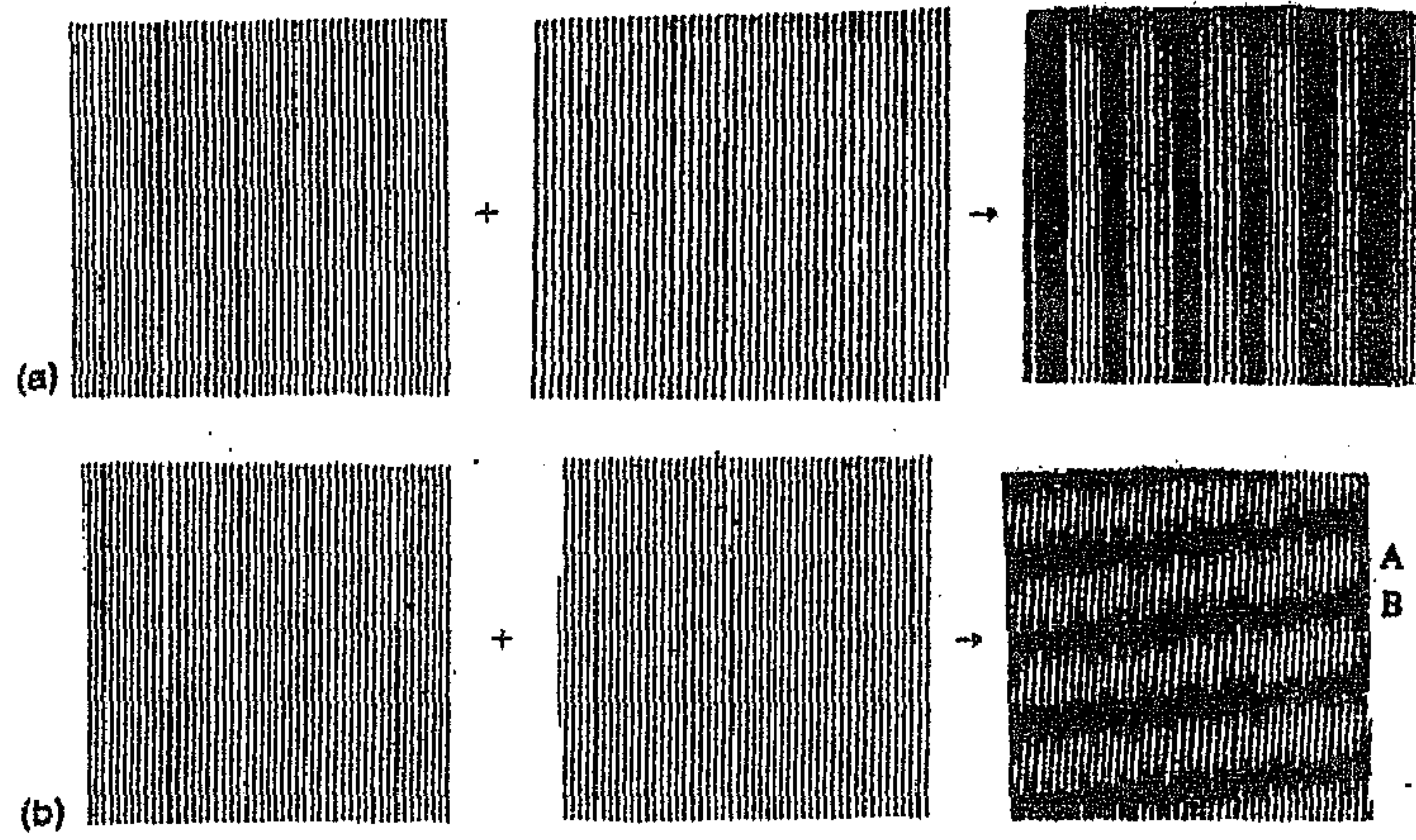

**الشكل (7-31) (a) صورة المجال المضيء و (b) صورة المجال المظلم لخلل النسق في كاربيد الفناديوم (VC) تكون الاهداب متشابهة عند تلاقي الخلل مع السطح العلوي في A ومكملته عند B .**

تتكون صورة مشابهة لما في الشكل (7-31) في حالة احتواء البلوره على التوئمه (twinning).

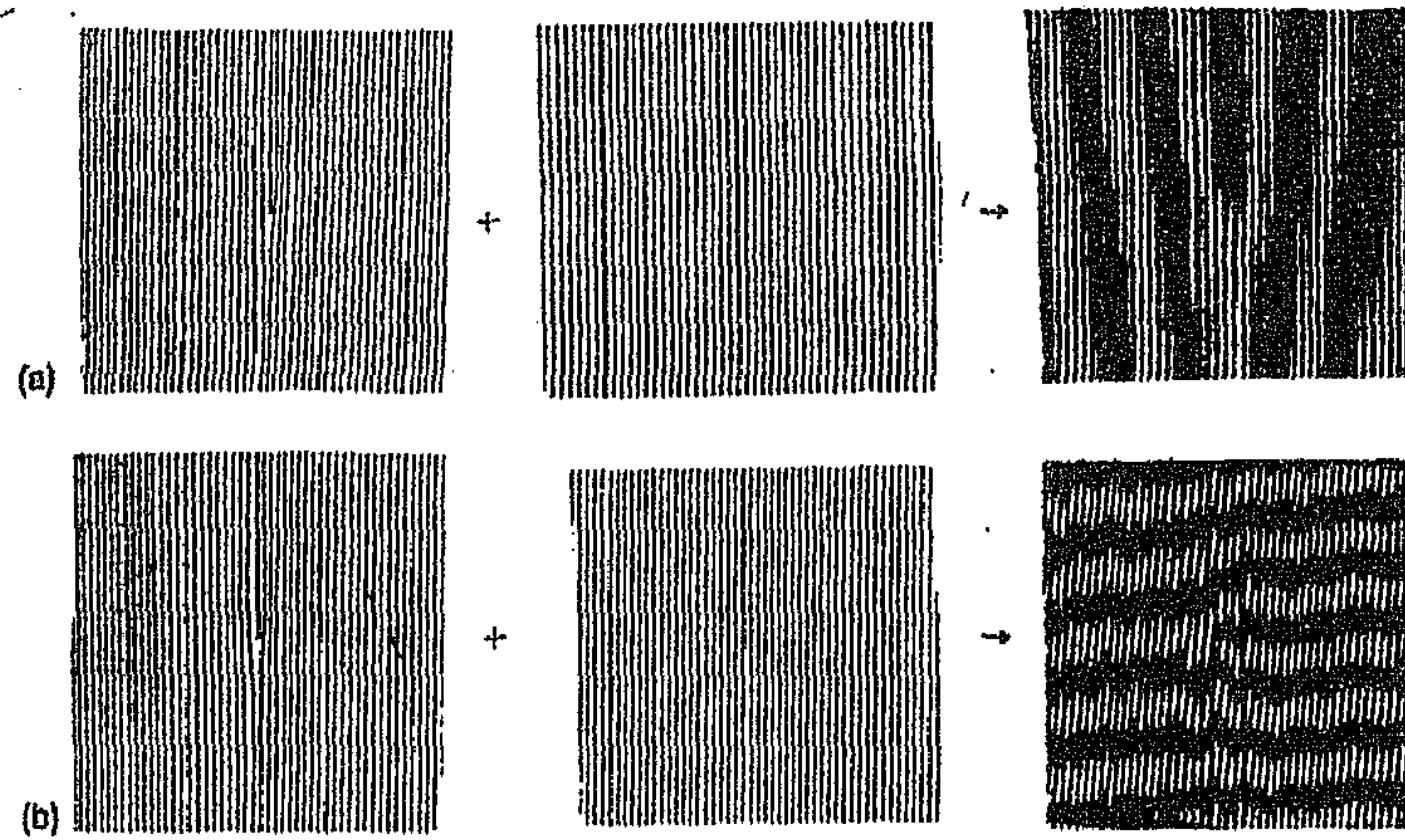
٤- أهداب مواره "Moire fringes" ، وهي الاهداب التي تتكون نتيجة لتراكب مجموعتين من الخطوط المتوازية بأسلوب يوضحه الشكل (7-32) . تكون مجموعتا الخطوط موازية لبعضهما البعض، في احدى الحالتين إلا أن المسافة البينيه لاحدى المجموعتين تختلف قليلاً عن الاخرى بينما تكون المسافة البينيه في الحالة الثانية متساوية للمجموعتين الا ان احدى المجموعتين تميل عن الاخرى قليلاً. تتكون الاهداب ايضاً عند ضم هذين النوعين من عدم التوافق (mismatch) الى بعضهما .

وهكذا يمكن ان تتولد اهداب مواره في المجهر الالكتروني اذا تراكبت بلورتان لهما مستويات انعكاس بحيث تُرى مساقطها كأنها مجموعتين من خطوط متوازية كما في الشكل (7-32) . بحيث اما ان تكون مستوياتهما متوازية والمسافة البينيه لهما متساوية تقريباً (لكنها تختلف) او متساوية المسافة البينيه إلا أنهما مائلتين قليلاً بالنسبة لبعضهما . تحدث الاهداب، بالإضافة الى ذلك، عندما يكون هناك ميل قليل والمسافة البينيه متساوية تقريباً (لكنها تختلف).

وعند فرض ان احدى البلورتين فيها انخلاعه طرفيه (او لولبيه) وأن مستوياتهما متوازية تماماً والمسافة البينيه فيهما متساوية تقريباً فيكون نموذج الاهداب كما في الشكل (7-33) (a) ويكون شكل الاهداب كما في الشكل (b) عندما يكون بين مستويات البلورتين ميل قليل.




الشكل (7–32) تكوين اهداب مواره بواسطة مجموعتين متراكبتين من الخطوط (a) متوازية لكنه مختلفة في المسافة البينيه بينهما (b) متساوية في المسافة البينيه لكن أحداهما مائلة بالنسبة للأخرى.




الشكل (7-33) تكوين اهداب مواره بتراكب شبيكتين احداهما تحتوي على انخلاعه طرفيه (a) المستويات متوازية لكن لهما مسافتين بينيتين مختلفتين (b) المسافتان البينيتان متساويتان لكن المستويات مائلة بالنسبة لكل منهما.

يمكن فهم تكوّن نمط (أهداب) مواره في صورة المجهر الالكتروني بوساطة تأثير تراكب بلورتين على نمط حيود الالكترونات. فتكوّن البلوره الاولى مجموعه من الحزم المحاده والتي تعتبر كحزم ساقطة عندما تدخل الى البلورة الثانية. يتكون نمط الحيود النهائى من نمط الحيود لكل بلوره على انفراد اضافة الى الانعكاسات المتولدة من آلية الحيود المزدوج. فإذا كانت البلورتان مائلتان قليلاً عن بعضهما بحيث يولد الحيود المزدوج حزمة موازية تقريباً الى الشعاع الساقط، ويمر خلال الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية المستخدمة. فتتولد اهداب مواره من اتحاد حزمة الحيود المزدوج مع الحزمة الاساسية غير المحادة. تظهر اهداب مواره في الصورة اعتماداً على قدرة تمييز المجهر نفسه. تكون المسافة البينيه لأهداب مواره (D) مساوية للمسافة الخاصة بالبعد الفاصل بين حزم الحيود المزدوج في نمط الحيود.

إذا كانت $d_1$ و $d_2$ تمثلان المسافة البينية لمستويات البلورتين اللتين تكوّنان اهداب مواره و D هي المسافة البينيه لاهداب مواره فتكون

$$D = \frac{d_1 d_2}{|d_2 - d_1|} \quad \text{..............} (26\text{-}7)$$

للأنماط المتوازية. كما أن

$$D = \frac{d}{\Phi} \quad \text{................} (27\text{-}7)$$

للأنماط المتماثلة والمائلة بزاوية $\Phi$ (أي عند كون $d=d_1 = d_2$ ). و ان

$$D = \frac{d_1 d_2}{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 - d_1 d_2 \cos\Phi}} \quad \text{................} (28\text{-}7)$$

للأنماط غير المتماثلة (أي عند كون $d_1 \neq d_2$ ) والمائلة بزاوية $\Phi$ .

يمكن اعتبار نمط مواره كصوره مكبره للشبيكة البلوريه لاحدى البلورتين المكوّنه للنمط . لذا يُعرّف تكبير مواره (M) بالآتي:

$$M = \frac{d_2}{|d_2 - d_1|} \quad \text{..............} (29\text{-}7)$$

## ٩-٥-٧ أسلوب تكوين الصور وتسجيلها وأنواعها:

يمكن تسجيل أكثر من نوع من أنواع الصور حيث تكمّل معلومات كل نوع النوع الآخر وبالتالي تكتمل المعلومات الخاصة بالنموذج المفحوص. وقد تم التطرق الى انواع هذه الصور سابقاً لكنه نظراً لأهمية الموضوع سنستعرضها تباعاً.

أ- صور المجال المضيء(B.F.I. (Bright field image, ويتم الحصول عليها بادخال الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية وجعلها في مكان بحيث تسمح للإلكترونات النافذة، التي باتجاه الحزمة الساقطة ، فقط بالمرور خلالها لتكوّن الصورة اي ان الفتحة تمنع كل الالكترونات المحاده من الاشتراك في تكوين الصورة. فالصورة الناتجة تسمى بصورة المجال المضيء اي ان الاجزاء التي تحيد الالكترونات تبدو داكنة في حين تبدو بقية اجزاء الصوره مضيئة ومعنى هذا ان اساس الصوره مضيء وفيها مناطق داكنه. و كذلك إذا تم امتصاص الالكترونات من قبل المناطق السميكة او ذات العدد الذري الاكبر او الترسبات فتظهر داكنة ايضاً بسبب عدم امكانية الالكترونات من النفوذ خلالها. ويتحقق مثل هذا النوع من الصور في المواد البلورية وغير البلوريه.

ب- صورة المجال المظلم(D.F.I. (Dark field image ويتم تحقيق مثل هذا النوع من الصور بالسماح لأحد الحزم الالكترونية المحاده فقط لتكوين الصوره. ويتحقق ذلك عملياً اما بتحريك الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية حتى تدخل الحزمة المحادة المطلوبة خلالها. أو بإمالة الحزم الإلكترونية (تتوفر هذه التسهيلات في المجاهر الالكترونية النافذة الحديثة) حتى تدخل الحزمة المحادة خلال الفتحة الضوئية لتكوين الصوره. وعندها تكون الصورة ذات ارضية داكنة ماعدا لاجزاء التي تحيد تلك الحزمة المحادة فتبدو مضيئة. ومن هنا يتضح انه يمكن تكوين عدة صور مجال مظلم كل واحدةٍ خاصة بإحدى الحزم المحاده، ويتحقق هذا النوع من الصور في المواد البلوريه فقط.

جـ- صورة المستويات الذرية المباشرة، بما أن الذرات مرتبة في المواد البلورية بمستويات معينه تسمى بالمستويات الذرية، فيمكن تصوير مساقطها ومن ثم قياس المسافات البينيه لها مباشرة من الصور. و للحصول على هذا النوع من الصور، اولاً يجب ان يكون النموذج رقيقاً جدا وثانياً يجب ان يمتلك المجهر الالكتروني قدره عالية للتمييز وأخيراً تحريك الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية بحيث تسمح بمرور الحزمة الالكترونية النافذة وأحدى الحزم المحاده. وبنتيجة التداخل بين الحزمتين تظهر مساقط المستويات البلوريه الخاصة بتلك الحزمة على شكل اهداب.

د- صور حيود الالكترونات من مناطق مختارة، يبين الشكل (7-22) كيفية تكوين صور حيود الالكترونات والفرق بينهما وبين صورة المجال المضيء يستخدم هذا النوع من الصور لدراسة البنى البلوريه للمواد وللتمييز بين المادة البلوريه وغير البلوريه كما يتم استخدامها للتمييز بين المادة احادية البلوره ومتعددة البلورات او بين المادة ذات البلورات الصغيرة والخشنة او للتمييز بين الاطوار الموجودة وتحديدها الى آخر ذلك من المجالات. يمكن ان يتم تسجيل الصوره بواحد أو أكثر من الوسائل التالية:

١- على الشاشة المتألقه او

٢- على الكاميرا ذات الافلام المستوية (flat) المنفصلة أو

٣- على الكاميرا ذات الفلم المتصل الذي عرضه 35mm أو

٤- على كاميرات البلورويد والتي تظهر الصوره مباشرة ولايوجد في هذه الحالة قلم سالب (negative) .

٥- على شاشة عرض (monitor).

٦- وأخيراً الكاميرا العددية (digital camera) والتي بواسطتها يمكن ان تخزن الصور على الاقراص المرنه(floppy disks) مثلاً.

**١٠-٥-٧ اختيار مقدار الفولتيه المعجله:**

تستخدم الفولتيه الواطئة نسبياً للمواد اللينه والعضوية كما يحبذ في هذه الحالة استخدام الاصبع البارد (يتوفر في المجاهر الحديثة) للحفاظ على بنية المادة من التغيير بسبب الحرارة المتولدة عن الحزمة الالكترونية . أما مقدار هذه الفولتيه فتتراوح بين 20 الى 60 kV . أما عند فحص مواد صلبة او عالية الوزن الذري والكثافة فتستخدم اعلى ما يمكن من فولتيه متوفره في المجهر وتكون بحدود 80 الى 125 kV وهذا هو المتوفر في المجهر الالكتروني النافذ الاعتيادي. اما في حالة المجهر الإلكتروني النافذ عالي الفولتيه، فقد تصل الفولتيه المعجلة فيه الى 2MV ($2x10^6$V) وهذا النوع من المجاهر يستخدم لفحص النماذج السميكة نسبياً، وهو خارج عن مجال كتابنا الحالي.

**١١-٥-٧ طرائق تحضير العينات للمجهر الالكتروني النافذ:**

توجد طرائق عديدة لتحضير عينات ملائمة للمجهر الإلكتروني النافذ.

تتضمن أغلب الطرائق اما تحضير العينه مباشرة على شكل غشاء رقيق (thin film) او تخفيف سمك قطعة المادة المراد فحصها حتى تصبح بعض مناطقها رقيقة بحيث يمكن ان تخترقها الالكترونات . وقبل ان نوجز بعض التقنيات الاكثر أهمية يمكن القول ان المعادن وبعض المواد العضوية هي الأسهل التي يمكن تحضير عينات للمجهر من الكتل الكبيره منها. وفي الحقيقة فإن أي مادة مستقرة نسبياً يمكن تحضير عينه منها باستخدام احدى الطرائق التي سوف تذكر. لقد تمت دراسة المواد المختلفة الخواص بالمجهر الالكتروني كالخرسانه (Concrete) والزجاج والمعادن واللدائن (plastics) وخامات المعادن والألياف الكاربونية إضافة الى الانسجة الحيوانية والنباتية.

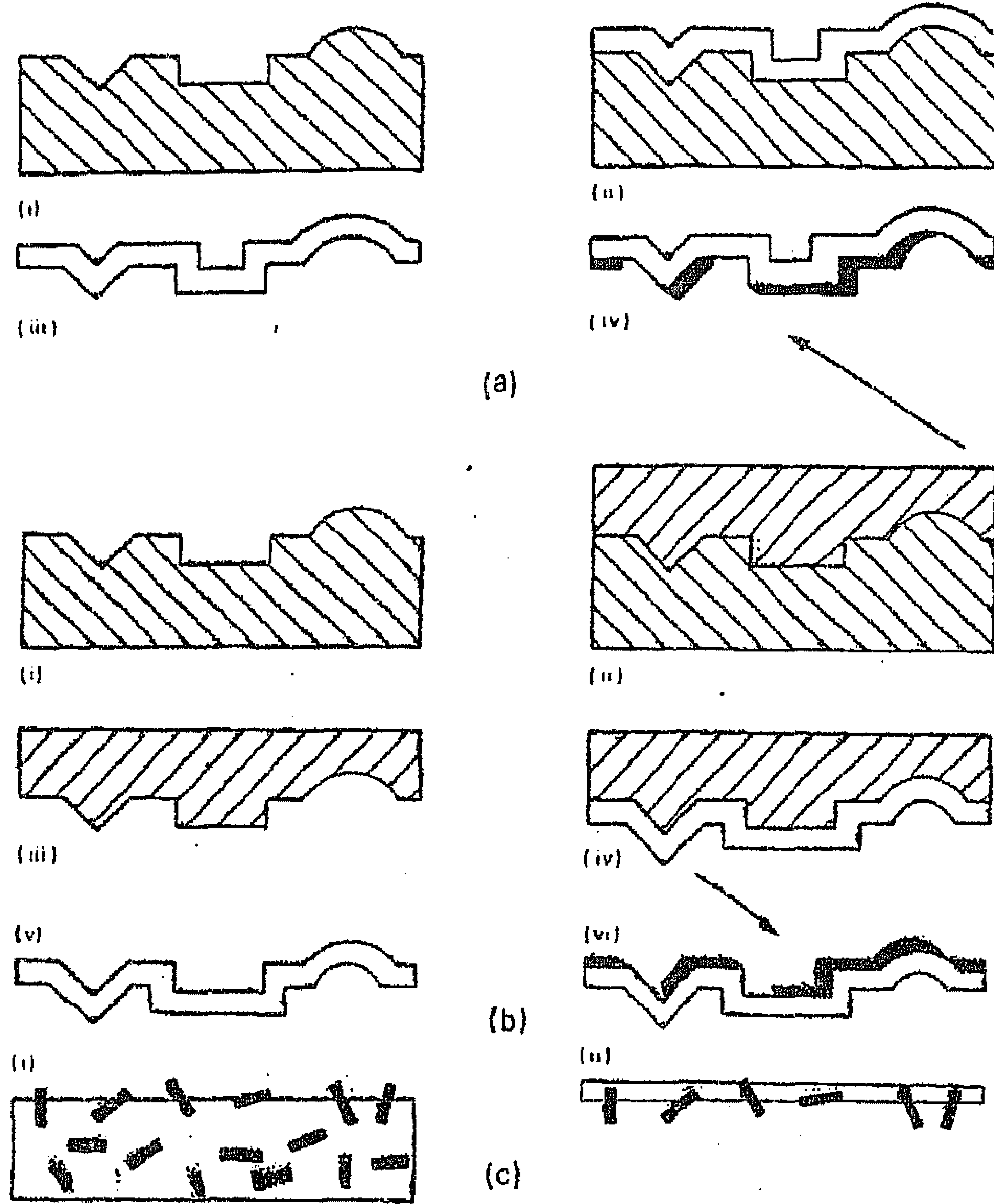
**١- الطريقة المباشرة لتكوين الاغشية الرقيقة.**

أ- بالتبخير: وفيها تسخن كمية قليلة من المادة في جو مفرغ (تحت ضغط افضل

من $10^{-4}$torr ) بحيث تتبخر . يتم تحقيق هذه الطريقة بمختلف التقنيات فأما ان يمرر تيار بسلك من المادة المراد تبخيرها او يتم طلاء المادة على شعيره تسخن بامرار التيار فيها او ان توضع المادة في بوتقة تسخين لتبخير المادة. توضع مادة ملائمة سائدة للغشاء المبخر في مكان ملائم حيث تصبح مطلية بطبقة من المادة المبخرة. يعتمد سمك هذه الطبقة على معدل التبخير والمسافة بينها وبين المصدر والزمن الذي يستمر فيه التبخير. يقطّع الغشاء الى قطع صغيرة ملائمة ثم تحرر من المادة الساندة اما بتعويمها بالماء او بإذابة المادة الساندة بمذيب ملائم (كما في حالة كون المادة الساندة ملح الطعام (rock salt) فيذاب في الماء على سبيل المثال). تلتقط هذه ا لقطع فيما بعد من سطح السائل باستخدام المشبك الساند (support grid) الخاص ومن ثم يثبت على حامل النموذج ليوضع في المجهر ويكون جاهزللفحص . تعطي بعض المواد مثل الكاربون أغشية لابلوريه اما القسم الاخر من المواد فتعطي اغشية بلوريه.

ب- طبعة السطح (surface replica) : يمكن دراسة تضاريس سطح النموذج وبقدرة تمييز عالية بعمل طبعة سطحية تكون خفيفة ومن ثم ملائمة للمجهر، يتم عمل الطبعة بعمليات تتضمن مرحلة او مرحلتين.

تطلى طبقة رقيقة من مادة ما، في طريقة المرحلة الواحدة، على سطح العينه كما مبين في (i) و (ii) من الشكل (7-34) (a) . فعلى سبيل المثال يمكن نشر قطره او قطرتين من محلول مادة لدائنية مثل الفورمفر (formvar) على السطح وتركها لتجف. أما إذا أريد قدرة تمييز عالية للعمل يمكن تبخير الكاربون لتكوين غشاء كاربوني على السطح وهو ما يستخدم غالباً. يمكن ان ينتزع هذا الغشاء الذي يمثل طبقة السطح، من سطح النموذج كما في الشكل(iii) ومن ثم يتم تقطيعه الى قطع ملائمة للفحص بالمجهر.




الشكل (7-34) (a) عملية تكوين الطبعة بمرحلة واحدة. سطح النموذج في (i) مُهيئ للعملية (ii) مطلي بمادة الطبعة (iii) الغشاء مخلوع من السطح ليعطي الطبعة، (iv) التظليل، اي ان معدناً عالي العدد الذري قد بُخرّ على السطح وبزاوية قليلة ليؤدي الى تظليل التضاريس السطحية ومن ثم رؤيتها بوضوح.

(b) عملية ذات مرحلتين فالطبعة الاولى في (iii) أكثر سمكاً من سابقتها ومن ثم فهي اقوى من طريقة المرحلة الواحدة يتم عمل طبعة رقيقة للطبعة الاولى ملائمة للفحص بالمجهر النافذ كما في (v) ويتم تضليلها حسب الحاجة.

(c) تحتاج طبعة الاستخلاص الى سطح محضر بحيث تكون دقائق الطور الثاني ناتئة منه كما في (i) يتم طلاء مادة الطبعة على هذا السطح ثم يذاب الجسم (النموذج) الصلب ليترك بعض الدقائق مطمورة في الطبعة كما في (ii) .

أما إذا لم يمكن ازالة الطبعه من السطح من دون تضررها فعندئذ يمكن عمل المرحلتين. فيطلى السطح بغشاء سميك من اللدائن (plastic) حيث ترتسم طبعة السطح عليه والذي يمكن ازالته من السطح بالسحب بسبب قوته، بوساطة شريط لاصق او بتعويمه في الماء. يتم طلاء طبعة السطح هذه بطبعة أخرى من الكاربون كما مبين في (iv)من الشكل (7-34) (b) ثم تذاب المادة اللدائنية فيما بعد لتترك طبعة الكاربون حرة كما في (v) .

ان التباين المتولد من هذه الطبعة غير جيد ، لكنه يمكن زيادته بطلاء كامل الطبعة او سطح النموذج قبل أخذ الطبعة بطبقة رقيقة من معدن ثقيل والذي يمتص بدوره الالكترونات اكثر مما تمتصه مادة الطبعة. فيبخر المعدن على سطح النموذج وبزاوية مائلة كما مبين في الشكل (7-34). فيعمل ترسب المعدن الثقيل ظلالاً لمعالم (تضاريس) السطح مما يزيد من التباين بصوره واضحة من جهة ويعزز تجسيم الصوره من جهة اخرى.

يمكن ايضاً دراسة توزيع وحجم وشكل الجسيمات المترسبة في المادة المدروسة بهذه الطريقة وتسمى عندئذ طبعة الاستخلاص السطحيةextraction surface) replica) وفيها يحضر السطح مسبقاً (على سبيل المثال يتم اظهاره بمحلول اظهار مناسب) بحيث ان جزء من الترسبات يكون فوق مستوى السطح قليلاً. الشكل (7-34) (c) . تُطلى مادة الطبعة على السطح فيما بعد ثم تذاب المادة الأساس للنموذج لتترك الترسبات وقد انغرست (علقت) في غشاء الطبعة. يتم تقطيع الغشاء ، كما سبق ، الى قطع تتلائم والفحص المجهري.

هناك تقنيات اخرى لتحضير اغشية رقيقة ملائمة للفحص المجهري الالكتروني تتضمن: الترسيب الكهروكيميائي على سطح مادة ساندة حيث يمكن اذابة المادة الساندة وتحرير الغشاء المراد فحصه ، على سبيل المثال حديد على نحاس. او تكوين

طبقة اوكسيد رقيقة تذاب بعدها المادة الصلبة التحتيه (تستخدم هذه التقنية بصوره خاصة مع الالمنيوم وسبائكه)؛ او تفاعل خليط من الغازات الملائمة لتكوين نواتج على هيئة بلورات صغيرة، يمكن التقاط بعضها على شبكة حاملة لها وفحصها بالمجهر.

**٢- التحضير من جرم النماذج نفسها: Preparation from bulk samples**

يجب ان تفي النماذج المحضرة للفحص بالمجهر النافذ بمتطلبين اساسيين:

أ- ان تكون خفيفة بصورة كافية بحيث تسمح للإلكترونات بالنفوذ من دون فقدان كبير في طاقتها.

ب- يجب ان تمثل المادة الاساس في البنيه والتكوين الكيماوي اي يجب تجنب اي تلويث او نواتج تفاعل اخرى او تشويه ثانوي او تعريض للحرارة اثناء عملية التحضير.

تتضمن عملية التحضير هذه مرحلتين:

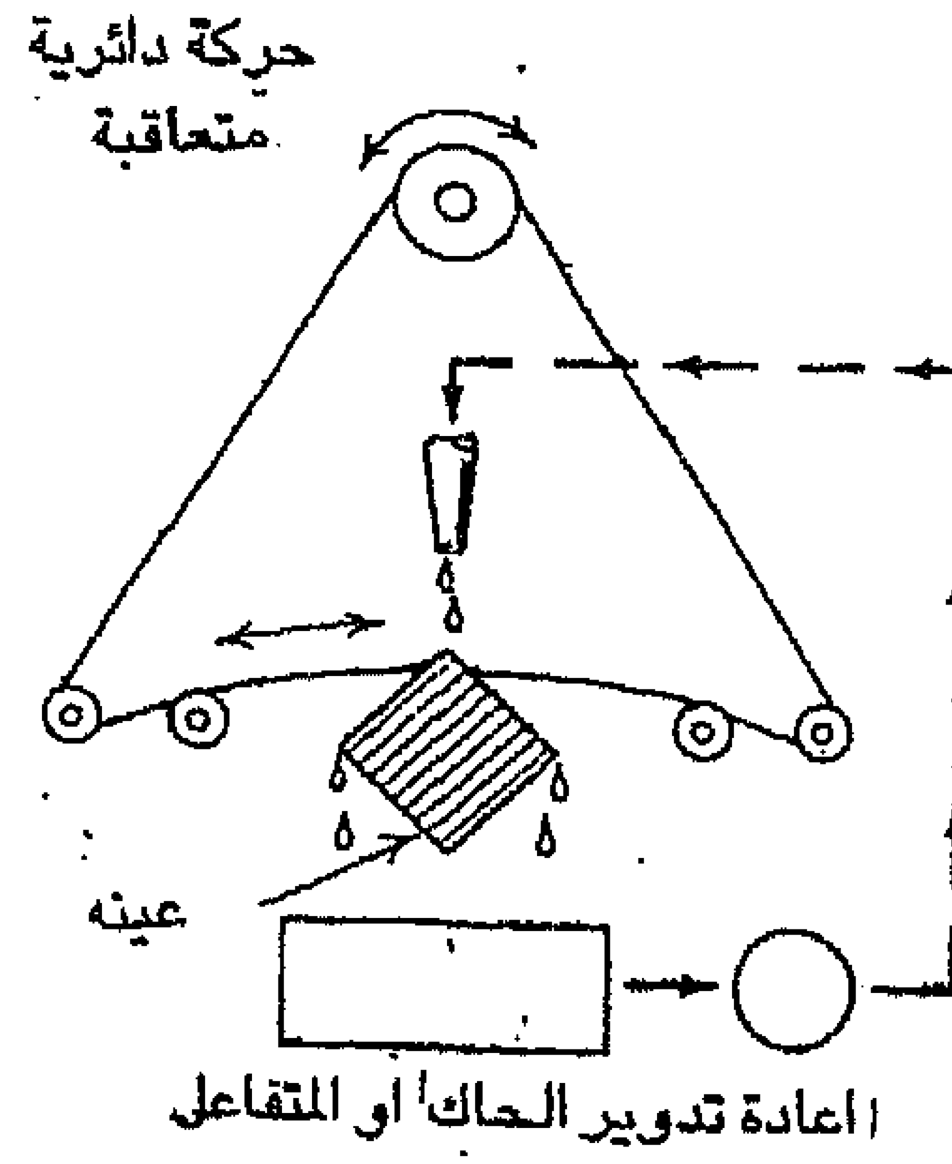
١- المرحلة الأولى : وهي الحصول على شرائح اولية خفيفة بحدود (0.5mm) او آقل من ذلك من المادة المراد دراستها.

تتم هذه المرحلة باحدى الوسائل التالية:

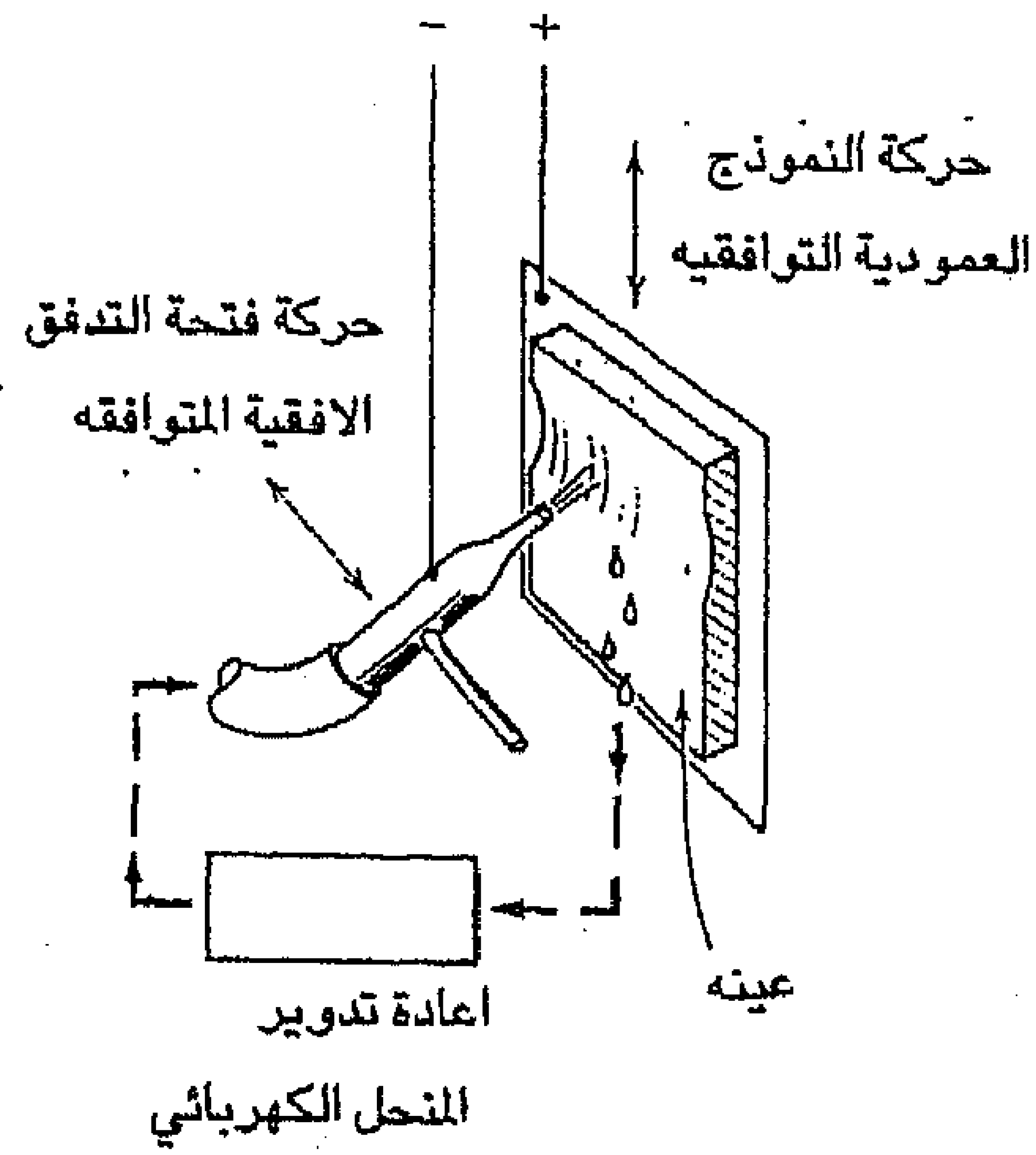
أ- القطع بالمنشار الميكانيكي الرقيق والناعم وباستخدام سائل للتبريد للحفاظ على بنية النموذج من التغيير.

ب- القطع بالخيط كيماوياً كما موضح في الشكل (7-35) وتستغرق هذه الطريقة وقتاً طويلاً نسبياً.

جـ- تخفيف المقاطع السميكة بتدفق السائل كهروكيميائياً الشكل (7-36) .




**الشكل (7-35) طريقة الحصول على الرقائق (slices) من جرم النموذج بوساطة منشار الخيط الكيماوي.**




**الشكل (7-36) طريقه ترقيق (تخفيف) الشرائح السميكة المقطع وتحويلها الى شرائح رقيقه بجهاز تدفق المنحل الكهربائي ومن جهة واحدة في كل مرة.**

د- القطع بجهاز القطع بالشرر الكهربائي (spark erosion cutter) والذي ينتج تجارياً لهذا الغرض. وفيه يتم غمر النموذج المراد قطعه في ماء مقطر او نفط ابيض (Kerosen) ويربط الى احد الاقطاب وهو الارضي (earth) ويقرب منه سلك متحرك يلتف باستمرار على بكره وبينهما (السلك والنموذج) فولتيه عالية مناسبة فيحدث تفريغ بينهما . ونتيجةلذلك تنصهر مناطق موضعية من النموذج ثم يبتعد السلك قليلاً ويعاود الاقتراب ثانية وهكذا حتى يتم الحصول على شريحة خفيفة نسبياً من النموذج.

٢- المرحلة الثانية: وهي مرحلة التخفيف النهائي اي الحصول على مناطق رقيقة يمكن فحصها وأخذ صوره لها بالمجهر الالكتروني النافذ. ويمكن استخدام واحده من التقنيات التالية وحسب طبيعة وشكل النموذج.

أ- التخفيف الكيماوي:

هنالك العديد من المواد يمكن اذابتها في المحاليل الملائمة وبسرعة نسبياً، فتوضع الشريحة المراد تخفيفها (ترقيقها) ولفترة معينه حتى يتم تخفيفها وتكون ملائمة للفحص. إلا أنه من النادر الحصول على نماذج صقيله السطح ورقيقة بحيث تلائم الفحص المجهري. وتتوفر في بعض المصادر جداول بالمحاليل الملائمة للمواد المراد فحصها على سبيل المثال L.E.Murr* .

ب- الأنشطار Cleaving :

تكون بنية بعض المواد البلورية على هيئة طبقات كالميكا (Mica) فيمكن فلقها (شطرها) والحصول على طبقات ذات سمك قد يبلغ 20nm في الظروف الملائمة. وذلك بلصق شريط لاصق على كل من وجهي البلوره الرقيقه وسحبه فتنشطر البلوره الى طبقات أرق. وهكذا حتى يتم الحصول على طبقة رقيقة ملائمة للفحص.

* L.E.Murr, "Electron optical Application in Materials Science" 1970 .

جـ- السحق (السحن) crushing :

لايمكن شطر المواد الهشة كالزجاج والصخور وسواها إلا أنه يمكن سحقها لتتحول الى دقائق ناعمة. فيمكن ان يكون قسم منها (الصفائحية او القشرية الشكل) رقيقة الى حد أنها ملائمة للفحص بالمجهر الالكتروني النافذ.

د- تقنية الصقل الكهربائي Electropolishing Techigue :

ويمكن ان تقسم الى ثلاث تقنيات رئيسية هي:

١- طريقة الفتحة (الشباك) window Technigue وتسمى ايضاً طريقة خلية المنحل الكهربائي (electrolytic cell method) .

٢- طريقة القطب المدبب (pointed - electrode method) وتدعى ايضاً بطريقة بولمان (Bollmann) .

٣- طريقة التدفق (Jet method) .

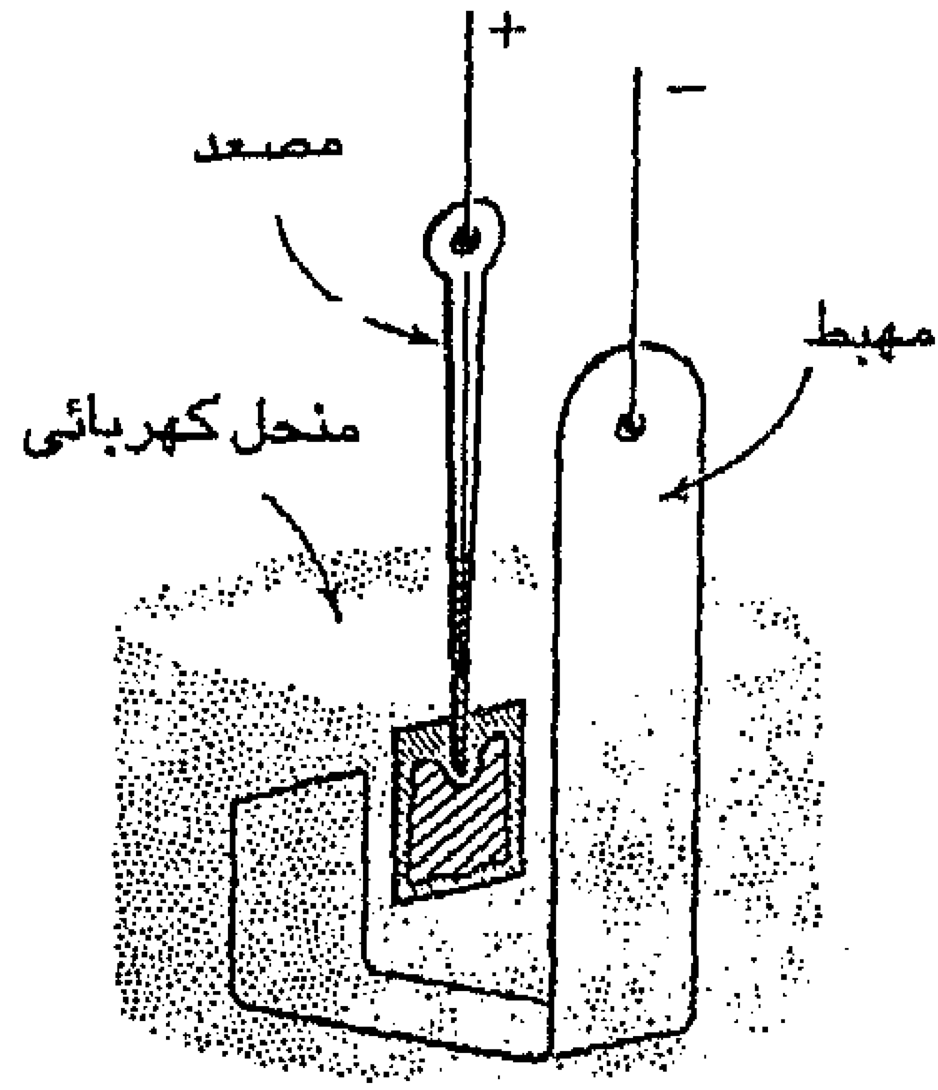
وطرائق الصقل الكهربائي هذه ملائمة لتحضير عينات من المواد الموصلة كالمعادن والسبائك ولذلك تعتبر من أهم التقنيات في فحص البنيه الدقيقة (micro-structure) للمعادن والسبائك.

١- طريقة الشباك: وفي هذه الطريقة يتم صبغ حافات النموذج الذي هو على شكل صفيحة رقيقة نسبياً بصبغ او صمغ او شمع الك (Lacquer)، على سبيل المثال، بحيث لايتفاعل مع المنحل الكهربائي (electrolytic solution) ومن ثم يحمي الحافات من التفاعل مع المنحل. يعلق النموذج الذي يمثل المصعد (anode) في وسط وعاء صغير سعته حوالي200ml يحتوي على المنحل بحيث ينغمر النموذج كلياً في المنحل. يكون المهبط (cathode)من نفس مادة النموذج او من فولاذ مقاوم للصدأ وبهيئة شريط عل شكل حرف U او اسطوانة تحيط بالمصعد (النموذج)شكل

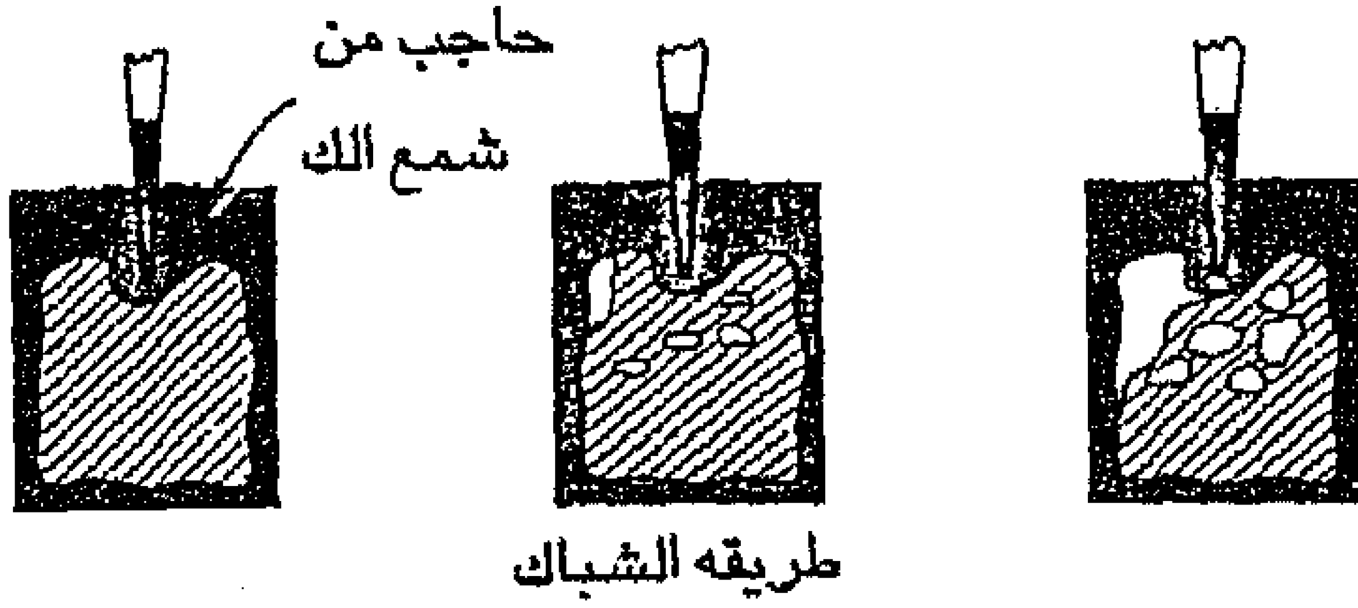
(37-7) . تسلط فولتيه معينه (وحسب مساحة النموذج و تركيز ودرجة حرارة المنحل الكهربائي) بحيث يمر تيار مناسب في المحلول (حوالي 80mA). تظهر بعد برهة من بدء مرور التيار ثقوب في شباك الرقاقة . وعند الاستمرار في عملية الصقل الكهربائي تكبر الثقوب شيئاً فشيئاً وتقترب من بعضها وعندئذ ستحتوي الشريحة (الشباك) على مقاطع رقيقة اي شفافة للإلكترونات عند الحافات، كما في الشكل (7-38) . يكون مقدار التيار والفولتيه التي تعطي احسن ظروف صقل، عند منطقة ثبوت التيار (Pla-teau) في منحنى الفولتيه / تيار المرسوم لتلك المنظومة ، الشكل (7-39) .

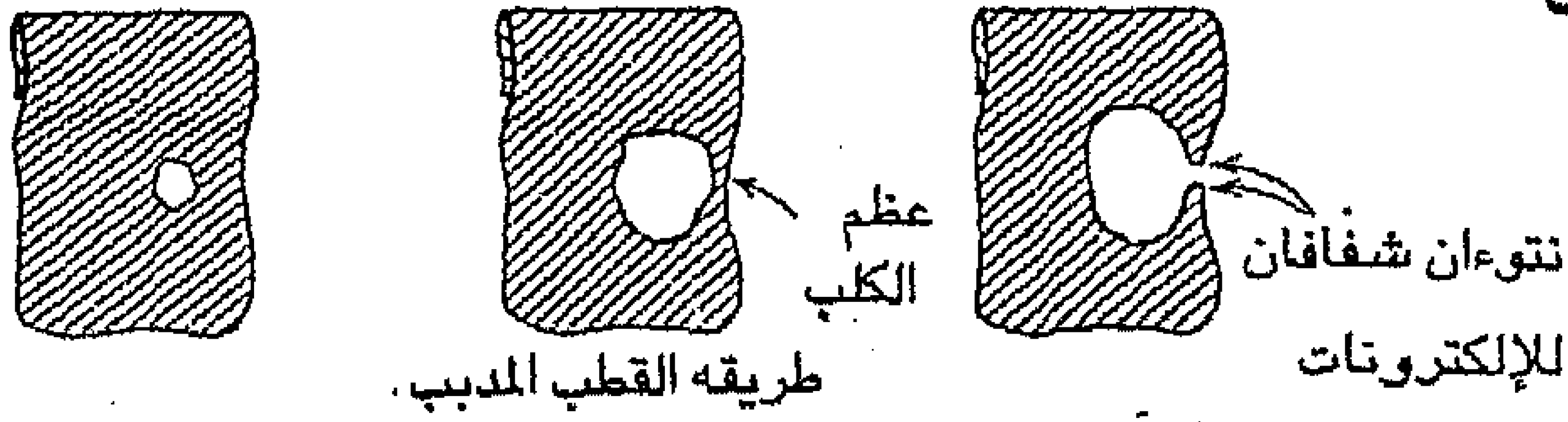
٢- طريقة القطب المدبب: يوضح الشكل (7-40) هذه التقنية. يكون المصعد فيها هو حامل النموذج والمهبط عباره عن قطبين مدببين من الفولاذ المقاوم للصدأ.يكون قياس النموذج على وجه التقريب 1x2 cm ويعلق في المصعد بين القطبين المدببين (المهبط) بحيث تكون المسافة بينهما من كل جهة حوالي 0.5 mm . وبالقرب من مركز النموذج. يظهر ثقب بعد فترة وجيزة من الصقل، يحرك بعدها النموذج بحيث يكون القطبان بين الثقب والحافة الاقرب للنموذج وعندها يتم سحبهما الى مسافة ابعد عن سطح النموذج (حوالي 1 الى 2mm ). تستمر بعدها عملية الصقل الكهربائي عند نفس مقدار التيار الذي استخدم اولاً حتى تحدث فجوة (فتحة) في الحافة كما هو مبين في الشكل (7-38) اعلاه. يمكن ايقاف العملية قبل ان تتكون فتحة في الحافة حيث يكون ذلك مفضلاً في بعض التطبيقات. يتم قطع القطعتين الموجودتين على جانبي الفتحة حيث تكون جاهزة للفحص بعد الغسل والتجفيف طبعاً.

وفي كلتا الطريقتين آنفتي الذكر يعتمد النجاح في الحصول على اجزاء رقيقة صالحة للفحص المجهري على تركيز المحلول ونوعه ودرجة الحرارة وتحريك المحلول والتيار والفوتليه اضافة الى النظافة والتأني في العمل لأن الاستعجال يؤدي الى بعثرة الجهود ومن ثم الى نتائج غير مرضية.

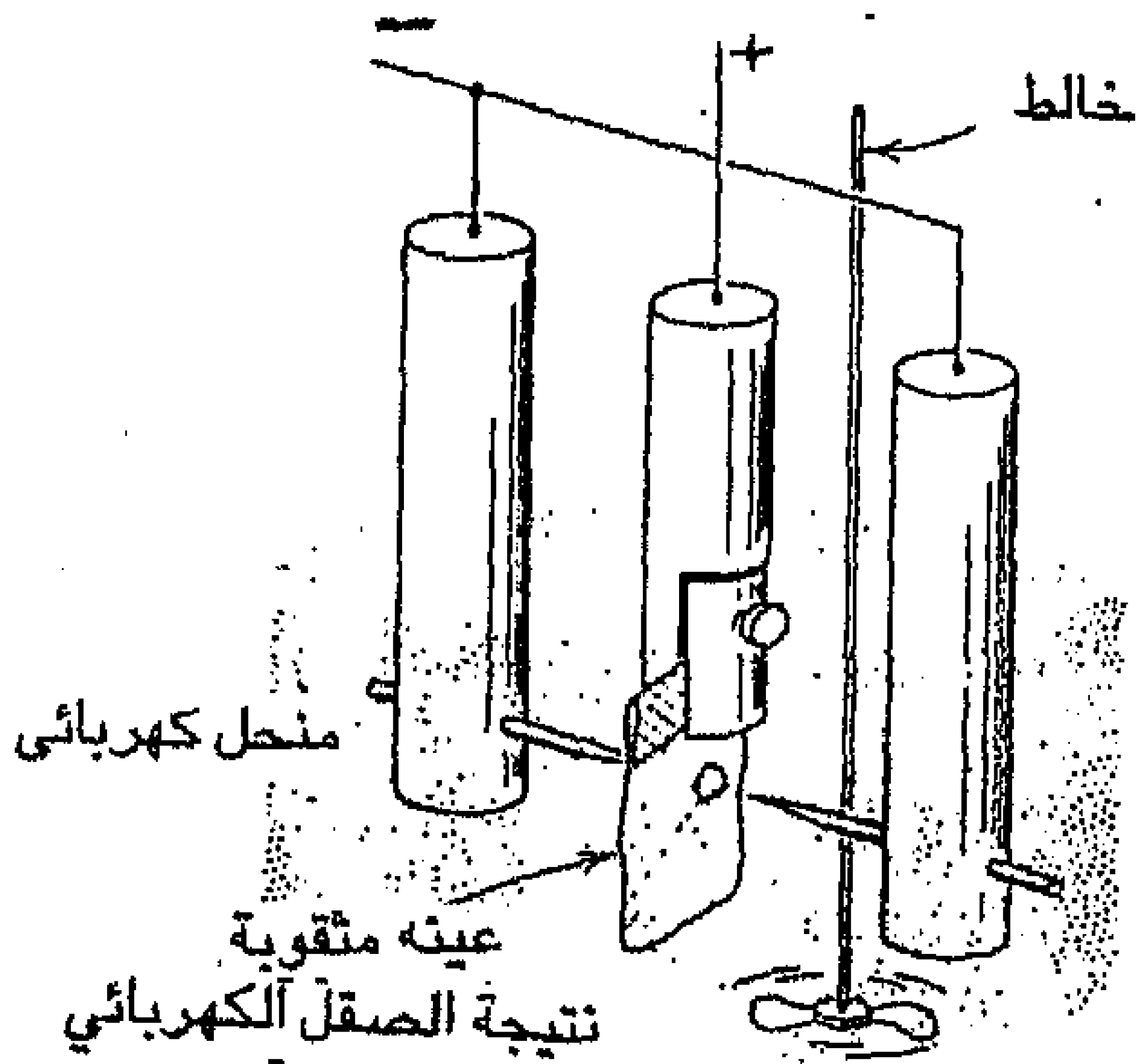



الشكل (7-37) طريقة الشباك وهي احدى طرق الترقيق بالصقل الكهربائى.

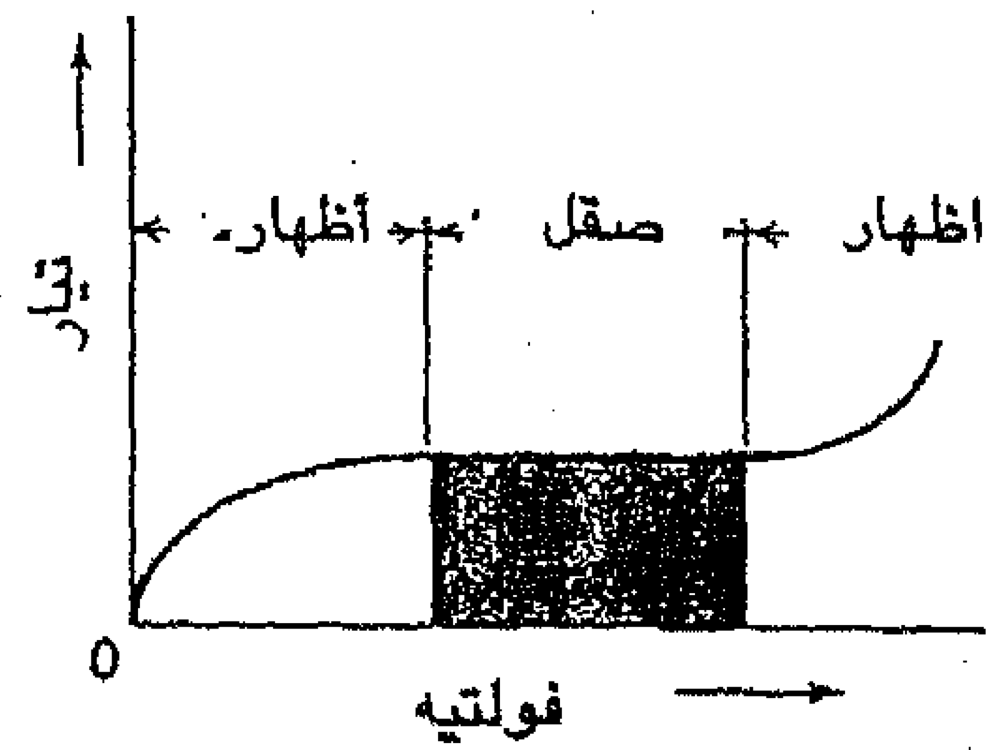



الشكل (7-38) نشوء المناطق الرقيقة والشفافة للإلكترونات اثناء عملية الصقل الكهربائى.

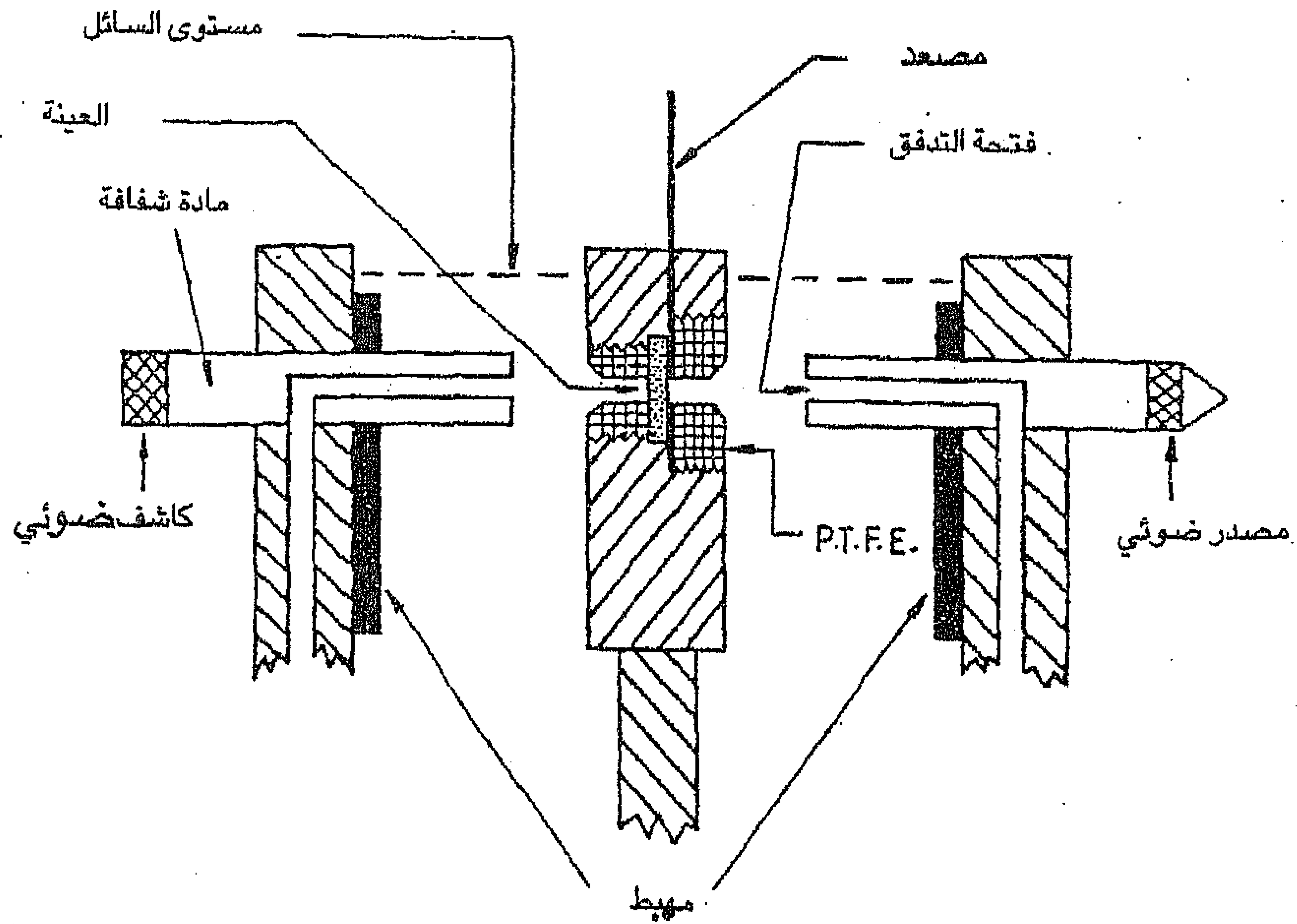



الشكل (7-40) الصقل الكهربائي بطريقة الاقطاب المدببة (طريقة بولمان).




الشكل (7-39) منحنى اختيار الفولتيه المناسبة للصقل الكهربائي.

٣- طريقة التدفق Jet method : يجب ان يكون النموذج في هذه التقنية على شكل قرص قطره 3mm (وهو نفس قطر حامل العينه في المجهر الالكتروني النافذ). يوضع هذا القرص الذي سمكه حوالي 0.4mm في المركز بين فتحتي انبوبين قطر كل منهما 1mm . يتدفق المنحل الكهربائي الملائم منهما على مركزي سطحي القرص. تستسخدم فولتيه وتيار ودرجة حرارة ملائمة. على سبيل المثال، في حالة الالمنيوم يستخدم 20V، و 80mA مع محلول متكون من 20% حامض البيركلوريك "Perchloric acid" مضافاً اليه 80% كحول اثيلي نقي وعند درجة الصفر المئوي). تستمر العملية حتى حدوث ثقب في النموذج وعند هذه اللحظة تقطع خليه ضوئية الدائرة الكهربائية آلياً، يمثل الشكل (7-41) مخططاً لهذا الجهاز . يتم غسل القرص حال حدوث الثقب بالكحول ثم يجفف ويكون جاهزاً للفحص. يكون ربط النموذج الى القطب الموجب ويمثل المصعد ويستخدم قطب آخر من الفولاذ المقاوم للصدأ كقطب سالب (المهبط) ويكون الاخير مغموراً في المنحل باستمرار.




**الشكل (7-41) الصقل بالمنحل الكهربائى بتقنية التدفق على جهتي العينه.**

هـ- التخفيف بالقذف الايوني Ion bean Thinning

وتتضمن هذه الطريقة قذف ذرات سطح النموذج بأيونات عالية الطاقة (غالباً ما تكون ايونات الاركون وذات طاقة بين 5 الى 10keV) وفي جو مفرغ وتعرف هذه الطريقة بتقنية الرش (sputtering technigue). يتم تركيز حزمة الايونات لتهاجم مساحة محدودة من العينه. ويختلف معدل الازالة من مادة الى أخرى وحسب خواص مادة العينة، تستخدم هذه التقنية بشكل عام في المواد المتكونة من طورين أو أكثر. وذلك لانه عندما يزال الطور الاسهل تصبح مناطقه منخفضة عن بقية مناطق سطح العينة، بالنسبة لمستوي حزمة الايونات، ولذا تبقى محمية حتى تتم تعرية وازالة الاجزاء الاصلد (الاطوار الاخرى). وهكذا تتم ازالة طبقات متعاقبة بالتساوي من سطح النموذج الى ان يتم الحصول على سمك ملائم للفحص المجهري. ان العيب الاساس في هذه الطريقة هو كلفة الاجهزة العالية واللازمة لهذه العملية اضافة الى طول المدة المستغرقة (حوالي 24 ساعة) لكل عينة.

## ١٢- ٥ -٧ بعض تطبيقات المجهر الالكتروني النافذ:

## "Some Applications of TEM"

لقد تمت الإشارة هنا وهناك الى قسم قليل من التطبيقات إلا أنه من المفيد ذكرها بتفصيل أكثر.

يمكن استخدام المجهر الالكتروني النافذ لدراسة الكثير من الماهيات كالبنى المجهرية للمواد البلوريه وغير البلوريه والترسبات من حيث اشكالها وتوزيعها وطبيعتها وكذلك الحدود البلوريه وأهدابها وأشباه البلورات والتوأمه (twinning) وخلل النسق (stacking fault) اضافة الى الانخلاعات (dislocations) والخلايا الانخلاعية (dislocation cells) وعند مختلف الظروف، هذا بالنسبة لتقنية المجال

المضيء (bright field image) . أما عند استخدام تقنية المجال المظلم dark field image) فيمكن الحصول على معلوماتٍ مكملة لمعلومات المجال المضيء حيث يمكن دراسة المناطق او الترسبات الحائدة للإلكترونات حيث تظهر مضيئة في ارضية معتمة. في حين يمكن بتقنية حيود الالكترونات دراسة الاطوار الموجودة في النموذج حتى ولو كانت صغيرة سواء في ذلك الترسبات او نواتج التآكل والتأكسد. وكذلك التمييز بين المواد البلوريه وغير البلوريه وحتى التمييز بين المواد المتعددة البلورات واحادية البلوره. كما يمكن بتقنية الحيود التنبؤ بوجود التوجه التفضيلي (Preferred orientation) في المعادن وخصوصاً بعد اجراء عمليات التشويه اللدن (Plastic deformation). علماً بأن تقنية حيود الالكترونات تعطي معلوماتٍ أكثر وأدق مما هو عليه في حالة حيود الاشعة السينية. وقد لاتصلح الاشعة السينية لدراسة حيود بعض المواد (كما مرّ ذكره) وذلك لكبر طولها الموجي النسبي وعدم امكانية تحقيق قانون براك، حيث ان الطول الموجي للإلكترونات اقصر بكثير من طول موجة الاشعة السينية المستخدمة في الحيود.

اما على المستوى الكمي فيمكن قياس الحجم الحبيبي اذا كان صغيراً جداً(حيث لا يلائم المجهر الضوئي لذلك) أو حجم أشباه الحبيبات (subgrains) او حجم الخلايا الانخلاعية او قياس كثافة الانخلاعات وعند مختلف مستويات الانزلاق . وكذلك قياس سمك الرقيقة المعدنية (تحت الفحص). اضافة الى قياس طاقة خلل النسق (Stacking fault energy) وقياس ثابت الخليه (Lattice constant) سواء للمواد احادية البلوره او متعددة البلورات وبدقة عالية. ومن الجدير بالذكر أنه يلزم تبريد العينه، باستخدام تقنية الاصبع البارد (Cold finger) . لأن الحرارة المتولدة من جرّاء سقوط الحزمة الالكترونية على العينة تغيّر بعض معالم البنيه الدقيقة لها،

فعلى سبيل المثال، تتغيّر كثافة الانخلاعات وأشكالها وأسلوب تجمعها وربما تتغير الخلايا الانخلاعية وحتى أشباه الحبيبات ، في بعض الحالات ، أيضاً بسبب الحرارة المتولدة من الحزمة الالكترونية الساقطة.

ومن الممكن ايضاً قياس المسافة بين المستويات البلورية وبصوره مباشرة تقريباً وذلك عندما يكون النموذج رقيقاً جداً والجهاز ذو قدره تمييز عالية جداً وعند السماح للحزمة الالكترونية النافذة مع واحده او اثنتين من الحزم المحادة بالدخول الى الفتحة الضوئية للعدسة الشيئية (objective aperture) ونتيجة لتداخل هذه الحزم تظهر اهداباً لها علاقة مباشرة مع المستويات البلوريه للعينة.

## تمارين الفصل السابع – القسم الأول–

١– استخرج الطول الموجي للالكترونات عند استخدام فولتيه تعجيل قدرها 1MV . ملاحظة، استخدام العلاقة الخاصة المعتمدة على النظرية النسبية مرة ثم العلاقة المشتقة بطريقة الميكانيك التقليدي مرة أخرى . علّق على النتيجتين.

٢– ماهي النسبة بين حدي التمييز للمجهر الالكتروني عند 100kV فولتيه تعجيل وذلك للذي للمجهر الضوئي عند استخدام الضوء الأصفر (5000Å)، إذا فرض ان بقية الظروف متساوية. ماذا تستنتج من ذلك.

٣– اذكر نواتج التفاعل بين الحزمة الالكترونية الساقطة والجسم الصلب مع رسم تخطيطي يوضح ذلك.

٤– ماهي اهم عيوب العدسات المغناطيسية مع ذكر كيفية التقليل من أثرها.

٥– اشرح طرائق توليد الالكترونات مع الرسم التوضيحي كلما لزم ذلك.

٦– عدد أهم انواع الصور التي يمكن أخذها بالمجهر النافذ مع ذكر كيفية تحقيقها وما هي الفائدة منها.

٧– أ– ماذا يعني نمط الحيود الإلكتروني لمادة ما.

ب– ماهو الفرق بين صورتي المجال المضيء والمظلم.

٨– أ– وضعت بلورتان منفردتان رقيقتان من الذهب "Au" والبلاديوم(Pd) على بعضهما بحيث تكون مستوياتهما البلورية متوازية، ثم فحصت بالمجهر الإلكتروني النافذ (TEM) . كانت المسافة بين أهداب مواره الخاصة بالمستويات $(02\bar{2})$ هي 0.52mm . ماهي قوة تكبير الجهاز.

ب- تراكب غشاءان متماثلان من الذهب بزاوية ، وعند نفس تكبير الفرع (أ). وقد وجد ان المسافة البينيه للأهداب في نمط مواره غير المتوازي، للمستويات $(02\bar{2})$ هي 0.25mm. ماهي الزاوية بين مجموعتي هذه المستويات. علماً بأن للذهب والبلاديوم بنية (fcc) وأن ثابت البلوره للذهب $a_{Au}=4.08\ \AA$ وللبلاديوم $a_{Pd}=3.92\ \AA$.

٩- اذا سئلت ان تقيس كثافة الانخلاعات (dislocation density) على سبيل المثال، في قطعة من الالمنيوم 1x1x5 cm باستخدام المجهر الإلكتروني النافذ. فاشرح باختصار أفضل طريقة لتحضير نموذج صالح للفحص المجهري ويمثل المادة الأساس.

١٠- يمثل الرسم أدناه نمط حيودالالكتروناتلعنصر النيكل (fcc) متعدد البلورات، ثابت الشبيكة $a_{Ni}=3.524\ \AA$ احسب ثابت الكاميرا $(\lambda L)$ بالوحدات (mm.A) بوساطة رسم المنحني.

١١- أ- عرّف عمق المجال وعمق التبئير.

ب- احسب عمق التبئير لمجهر الكتروني يعمل عند قوة تكبير مقدارها 20000 ضعف، اذا كان عمق المجال فيه (300 nm).

١٢- أ- اذكر أنواع التباين الصوري في المجهر الإلكتروني النافذ.

ب- ارسم مخططاً توضيحياً للمجهر الإلكتروني النافذ.

١٣- احسب قطر الفتحة الضوية للعدسة الشيئية (بالميكروميتر) في المجهر الإلكتروني النافذ لقطعْ الحزمة الإلكترونيه المحادة الثانية من النحاس ($a=3.615\mathring{A}$) اذا علمت ان الفولتيه المستخدمة كانت 200kV وأن البعد البؤري للعدسه الشيئية (2mm).

١٤- اذكر كيف تتم رؤية مايلي، تحت المجهر الإلكتروني النافذ:

أ- الانخلاعات        ب- خلل النسق        جـ- الترسبات

د- التوأمة(twinning)        هـ- الحدود البلوريه        و- أشباه البلورات(subgrains).

## ٦-٧ المجهر الإلكتروني الماسح Scanning Electron Microscope (SEM)

### ١-٦-٧ المقدمة:

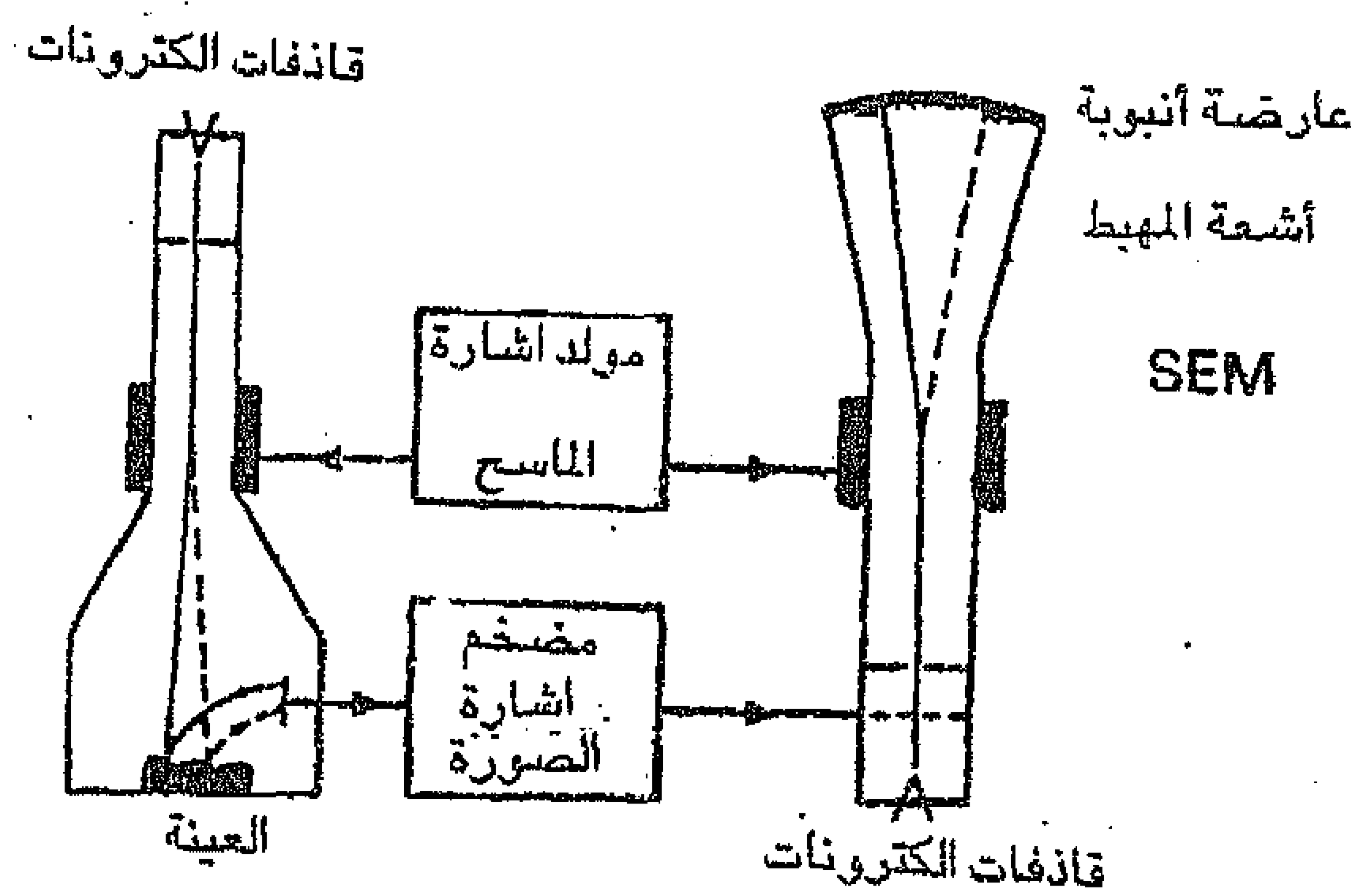
صمم المجهر الالكتروني الماسح أساساً لدراسة سطوح الاجسام الصلبة عند قدرات تكبير عالية. فيمكن من هذه الناحية مقارنته بالمجهر الضوئي العاكس (reflected back microscope) . وبسبب استخدام الحزمة الالكترونية يمكن الحصول على معلومات كثيرة جداً حول اتجاه البلوره والتكوين الكيماوي والبنيه المغناطيسية او الجهد الكهربائي (electrical potential) في النموذج.

### ٢-٦-٧ أساس عمل المجهر الماسح:

تتكون الصورة في المجهر الماسح بآلية مختلفة تماماً عن تلك التي في المجهر الضوئي او حتى في المجهر الالكتروني النافذ (TEM) . حيث يتم بناء الصوره نقطة فنقطة بصوره مشابهة لتكوّن الصورة على شاشة التلفاز، فلا تستخدم عدسة شيئية اذن. يتم تبئير حزمة الكترونية رفيعة عالية الطاقة بهيئة نقطة قطرها اقل من (5nm)على النموذج. يؤدي هذا الى انبعاث الكترونات ثانوية ذات مد ى واسع من الطاقة من تلك النقطة من السطح . يتم جمع وتكبير الالكترونات المنبعثة لتعطي اشارة كهربائية (electrical signal) تستخدم هذه الإشارة لتغيير شدة الحزمة الالكترونية في عارضة انبوبة أشعة المهبط (cathod ray tube) فتتكون نقطة واحدة من الصورة على عارضة انبوبة أشعة المهبط. ولأجل بناء كامل الصورة يتم مسح مساحة معينه من سطح النموذج من قبل الحزمة الالكترونية في المجهر (يدعى نمط خطوط المسح بالراسم) وفي نفس الوقت يتم مسح عارضة انبوبة أشعة المهبط (CRT)من قبل حزمتها الالكترونية بنمط مسح يتشابه هندسياً مع نمط المسح الأول. فالصورة المتكونة على عارضة انبوبة أشعة المهبط هي في الواقع خارطة لشدة الالكترونات المنبعثة من سطح النموذج.

يمثل الشكل (7-42) أساس عمل المجهر الالكتروني الماسح.

يمكن تغيير التكبير في المجهر الماسح من 20 الى 000 800 ضعف. أما حد التمييز له فهو حوالي 2.5 nm مقارنة بحوالي 300 nm للمجهر الضوئي .




**الشكل(7-42) نظام ماسح الحزمة الإلكترونية المستخدمة في المجهر الإلكتروني الماسح ، بشكل تخطيطي.**

## ٣-٦-٧ تصميم وبناء المجهر الالكتروني الماسح:

يتضمن المجهر الأجزاء الأساسية التالية مع عملها بصوره مقتضبه :

١- القاذف الالكتروني: لتوليد حزمة ضيقة من الالكترونات والتي يتم تعجيلها خلال فرق جهد عالي يصل الي 50kV .

٢- اثنين او ثلاثة عدسات لتبئير الحزمة الالكترونية الى ادق مايمكن.

٣- نظام لحرف الحزمة الالكترونية على النموذج بموجب نمط خطوط المسح .

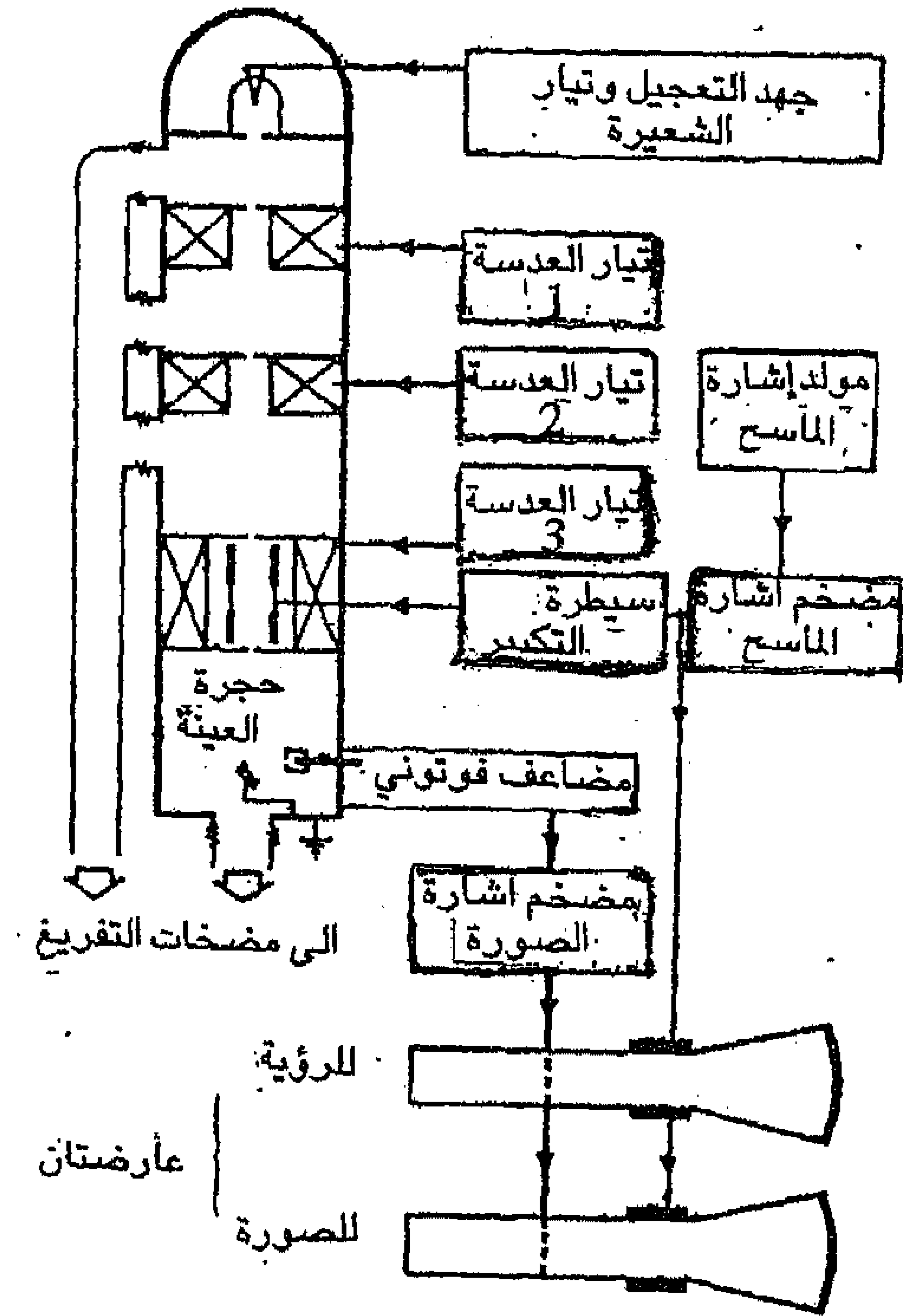
٤- مرحلة النموذج والتي تسمح للنموذج بالحركة الدائرية والمائلة وغيرها.

٥- جهاز لجمع وتكبير الالكترونات المنبعثة من النموذج والمنعكسة عنه.

٦- انبوبة أشعة المهبط أو أية وسيلة أخرى لعرض الصورة.

٧- دوائر الكترونية لتوليد او السيطرة على مولد الماسح وتكبير الاشارة والقاذف الالكتروني والفولتيه المعجلة وتيار العدسات وغيرها.

٨- نظام تفريغ ذا سعة عالية، لتفريغ عمود المجهر وحجرة النماذج. يبين الشكل (7-43) رسم تخطيطي للمجهر الماسح موضحاً الاجزاء الرئيسية فيه.




**الشكل (7-43) رسم تخطيطي للمجهر الالكتروني الماسح. أما التفاصيل كعدد العدسات وغيرها فتختلف من مجهر الى آخر وحسب الشركة المصنعة.**

ومن الجدير بالذكر ان العدسات الكهرومغناطيسية المكثفة والقاذف الالكتروني المستخدمة في المجهر الالكتروني الماسح مشابهة من حيث الاساس عما هو عليه في المجهر الالكتروني النافذ.

وسيتم التطرق الى بعض الاجزاء او المراحل غير المتشابهة مع ما هو موجود في المجهر النافذ (TEM) .

أ- مرحلة النموذج specimen stage :

يلزم ان تكون مرحلة النموذج مستقرة ميكانيكياً وتقبل اكبر مايمكن من النماذج. ويمكن فيها تحريك النموذج بالاتجاهات الثلاثة المتعامدة اضافة الى دوران النموذج وامالته لان ذلك يؤثر في تباين الصوره. كما قد يتم تزويد مرحلة النموذج بتسهيلات تسخين او تبريد للنموذج او حتى اجراء بعض الفحوصات الميكانيكية او التآكل داخل حجرة النموذج في المجهر.

**ب- جامع الالكترونات Electron collector**

ويتألف من شبكة في المقدمة والتي يمكن ان تحيَّز بفرق جهد مقداره ±250V نسبة الى النموذج (الموصول بالأرضي) . يقع الانبعاث الالكتروني من النموذج ضمن منطقتين اساسيتين ، فالكترونات عالية الطاقة والكترونات (ثانوية) منخفضة الطاقة. يمكن اذن استخدام فرق جهد الانحياز على الشبكة اما لسحب اكثر ما يمكن من الكترونات الثانوية الى الجامع (في حالة جهد الانحياز الموجب) او ارجاعها منعكسة الى الخلف (في حالة جهد الانحياز السالب) بحيث يسمح للإلكترونات ذات الطاقة العالية فقط لتشارك في تكوين الصورة . تمر الالكترونات المنتقاة خلال الشبكة وتدخل الى قفص جامع الالكترونات حيث تنجذب بقوة نحو العداد الومضي بجهد مقداره حوالي +12kV . يتم ارسال الضوء الومضي الى المضاعف الفوتوني (photomultiplier)حيث يتم تضخيمه واستخدامه في تغيير شدة الحزمة

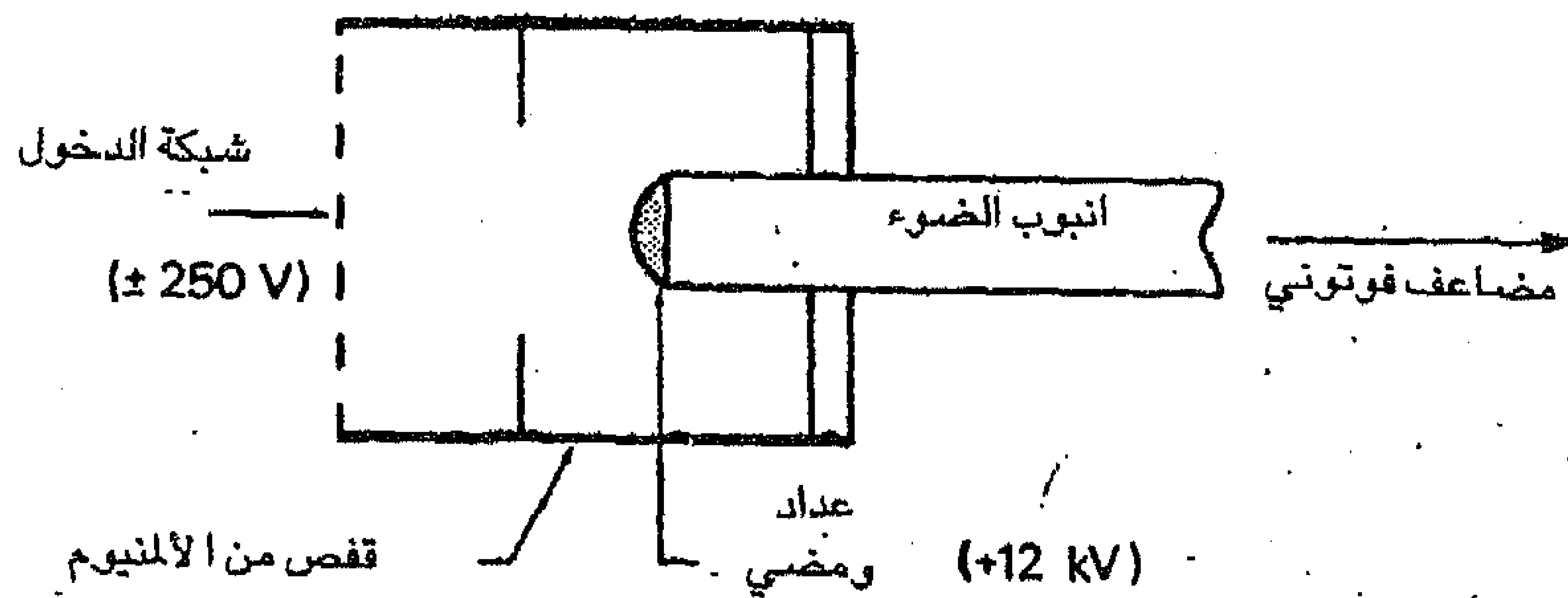
الالكترونية في انبوبة عرض اشعة المهبط. يبين الشكل (7-44) رسم تخطيطي لجامع الالكترونات.

**٤-٦-٧ آليات تباين الصوره:**

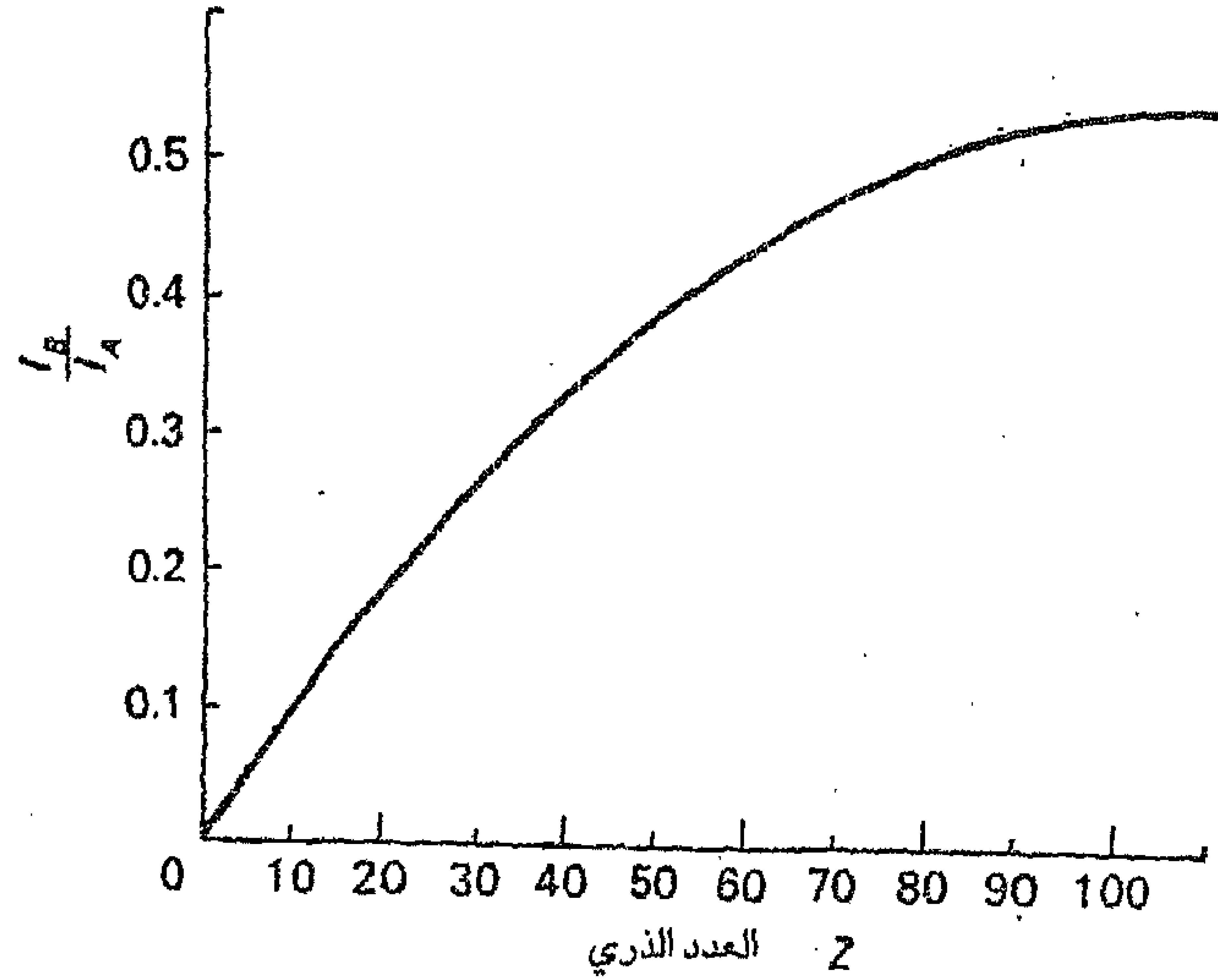
يحدث التباين الصوري في المجهر الالكتروني الماسح نتيجة للتفاعل بين الحزمة الالكترونية والنموذج. أما انواع الآليات فهي:

أ- انبعاث الالكترونات:

تعتمد الالكترونات المجمّعة والى مدى معيّن على العدد الذري (Z) لذلك فمن المتوقع وجود تباين العدد الذري.




**الشكل (7-44) رسم تخطيطي لجامع الالكترونات. تبقى الشبكة عند فولتيه بحدود +250V لجذب الالكترونات الثانوية وعند -250V لابعادها. اما الجهد العالي +12kV على العداد المتألق (scintillator) فهو لضمان ان كل الالكترونات التي في القفص سيتم جذبها الى العداد المتألق حيث تصطدم به وبطاقة كافية.**




**الشكل (7-45) نسبة الاستطارة الخلفيه الى الامتصاص مع العدد الذري.**

فإذا كانت المساحة تحت الفحص مكوّنه من عناصر مختلفة العدد الذري فمن المتوقع ان تصبح درجة الامتصاص اقل عند زيادة الكثافة (زيادة العدد الذري). وكنتيجة لذلك سيزداد عدد الالكترونات المنعكسة (المستطاره رجوعاً) بزيادة العدد الذري كما في الشكل (7-45) حيث تمثل $I_B$ شدة الالكترونات المنعكسة (المستطارة الى الخلف)و $I_A$ الجزء الممتص من الحزمة الالكترونية في النموذج.

أما انبعاث الالكترونات الثانوية فيعتمد على عدة عوامل:

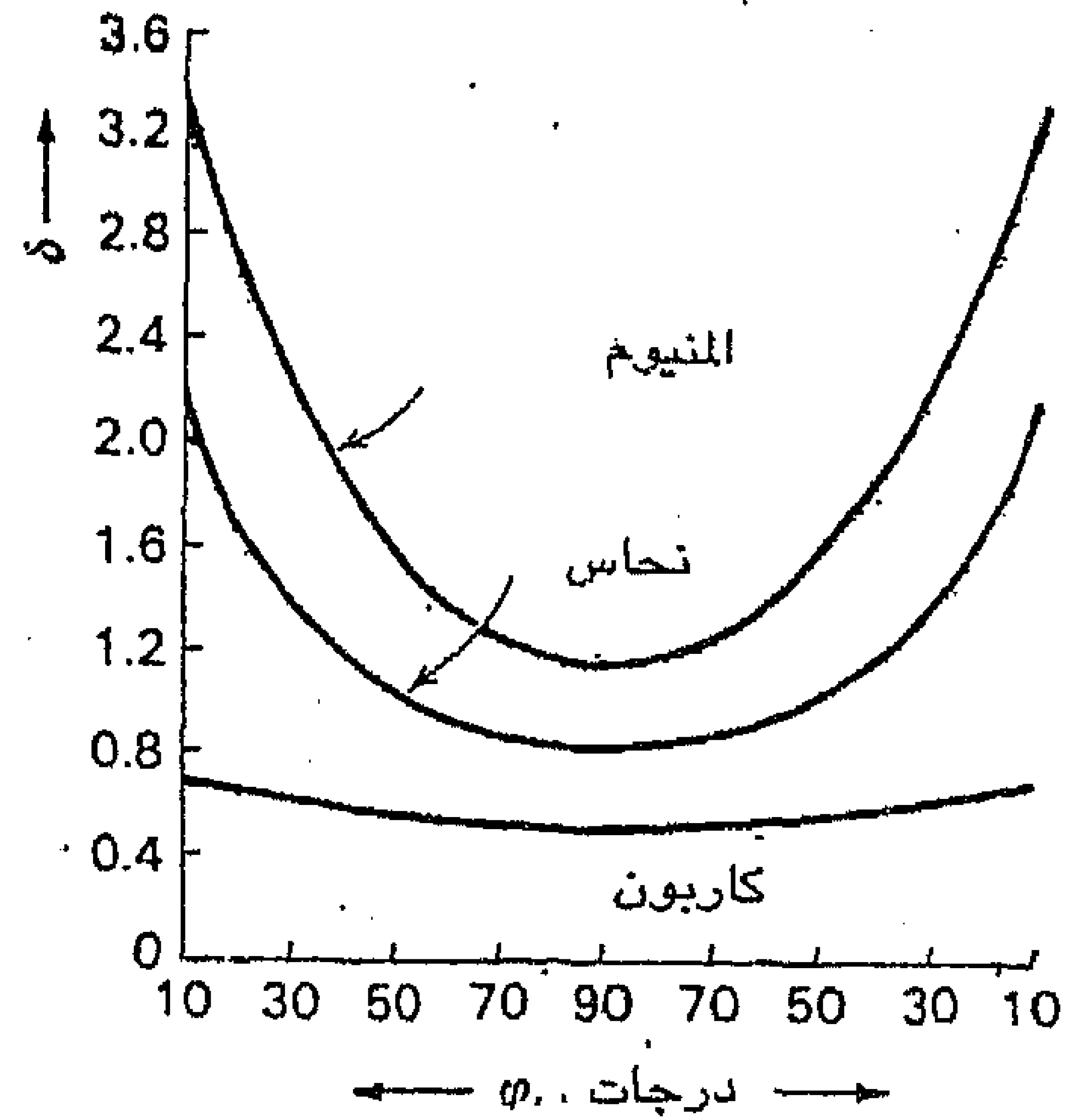
١– الفولتيه المعجلة للإلكترونات الساقطة.

٢– بنية السطح وخاصة الزاوية التي تصنعها الالكترونات الساقطة مع اي منطقة من مناطق السطح كما موضح في الشكلين (7-46) و (7-47).

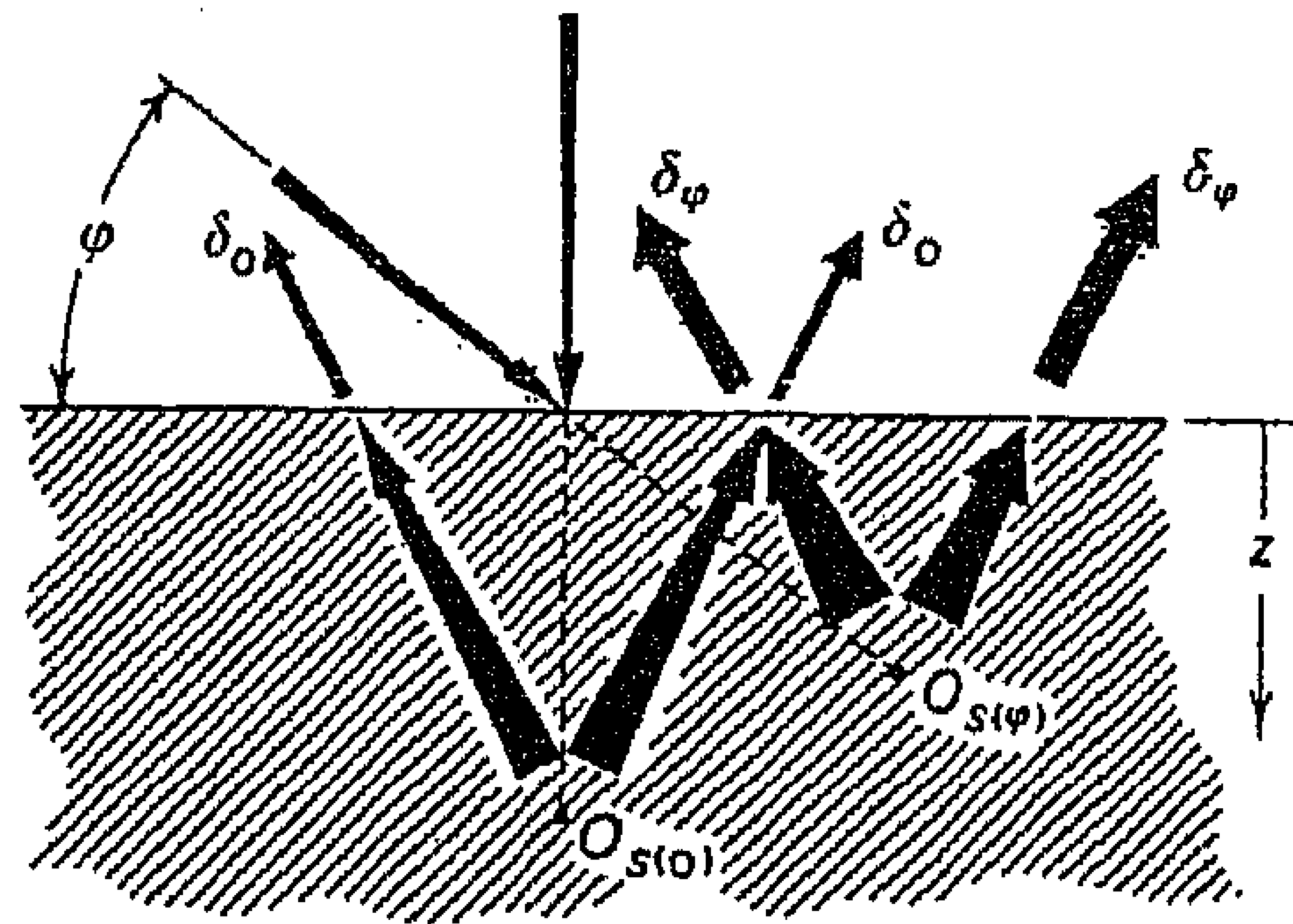
٣- الكثافة الموضعية لأي منطقة على السطح والتي تؤثر على قدرة اختراق الالكترونات الساقطة وامتصاص الالكترونات الثانوية.

٤- التكوين الكيماوي والبنيه البلوريه للسطح حيث يؤثر ذلك على حاجز الجهد (دالة الشغل) للإلكترونات الثانوية.

٥- التجمع الموضعي للشحنة الكهربائية على السطح.




**الشكل (7-46) ناتج انبعاث الالكترونات الثانوية كدالة للحزمة الالكترونية الأولية الساقطة.**

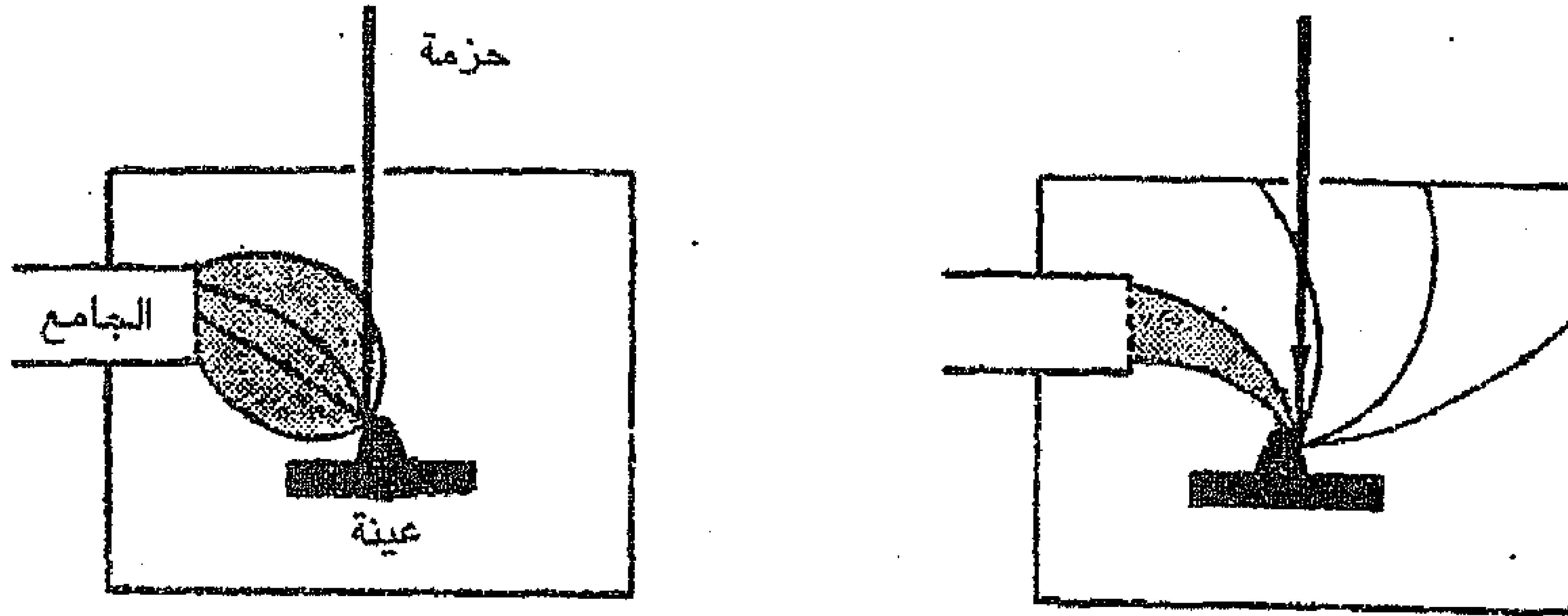



**الشكل (7-47) ناتج انبعاث الالكترونات الثانوية من الحزمة الاولية الساقطة.**

٦- التضاريس السطحية حيث يعطي تغيير زاوية انبعاث الالكترونات نوع من التباين ايضاً ، الشكلان (7-48) و (7-49) .

ب- الانبعاث الفوتوني:

١- الضوء المرئى، يتم جمع الفوتونات المنبعثة وتحويلها الى اشارة كهربائية مضخمة ومن ثم استخدامها في تغيير شدة الحزمة الالكترونية المكونة للصورة في عارضة انبوبة أشعة المهبط مثلاً.




**الشكل (7-48) تعزيز تباين التضاريس في المجهر الالكتروني الماسح من خلال الفروق في كفاءة جمع الالكترونات الثانوية، اعتماداً على مساراتها الاولية والتضاريس الموضعية فالسطوح المواجه لجامع الالكترونات تظهر أكثر اضاءة من تلك التي تكون سطوحها غير متوافقة مع اتجاه جامع الالكترونات.**

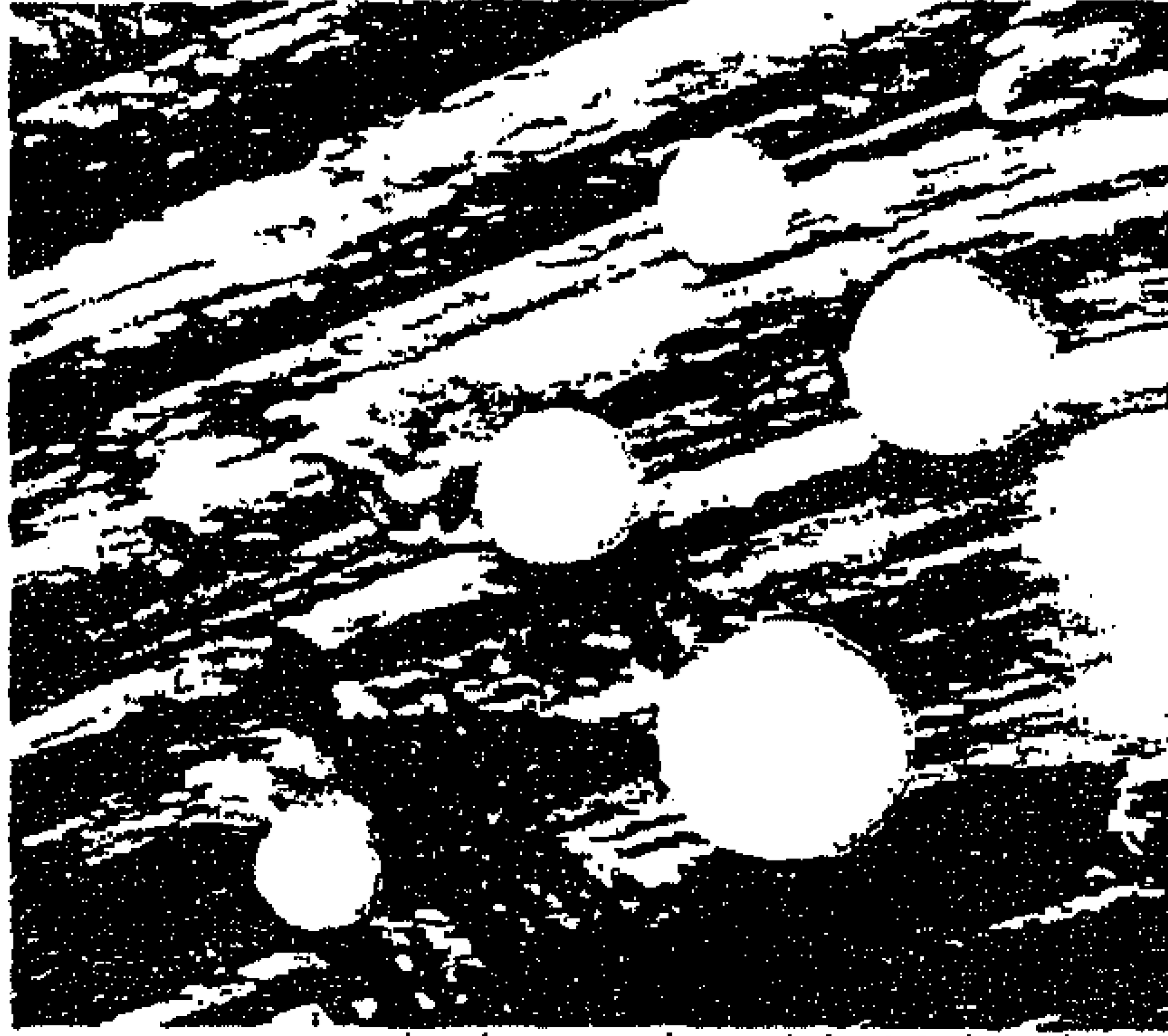
٢- انبعاث الاشعة السينية ، بما أن تردد ($\upsilon$) الفوتونات المنبعثة هو صفة مميزة للعنصر المراد دراسته كما عبر عنه قانون موزلي (Moseley`s law) .

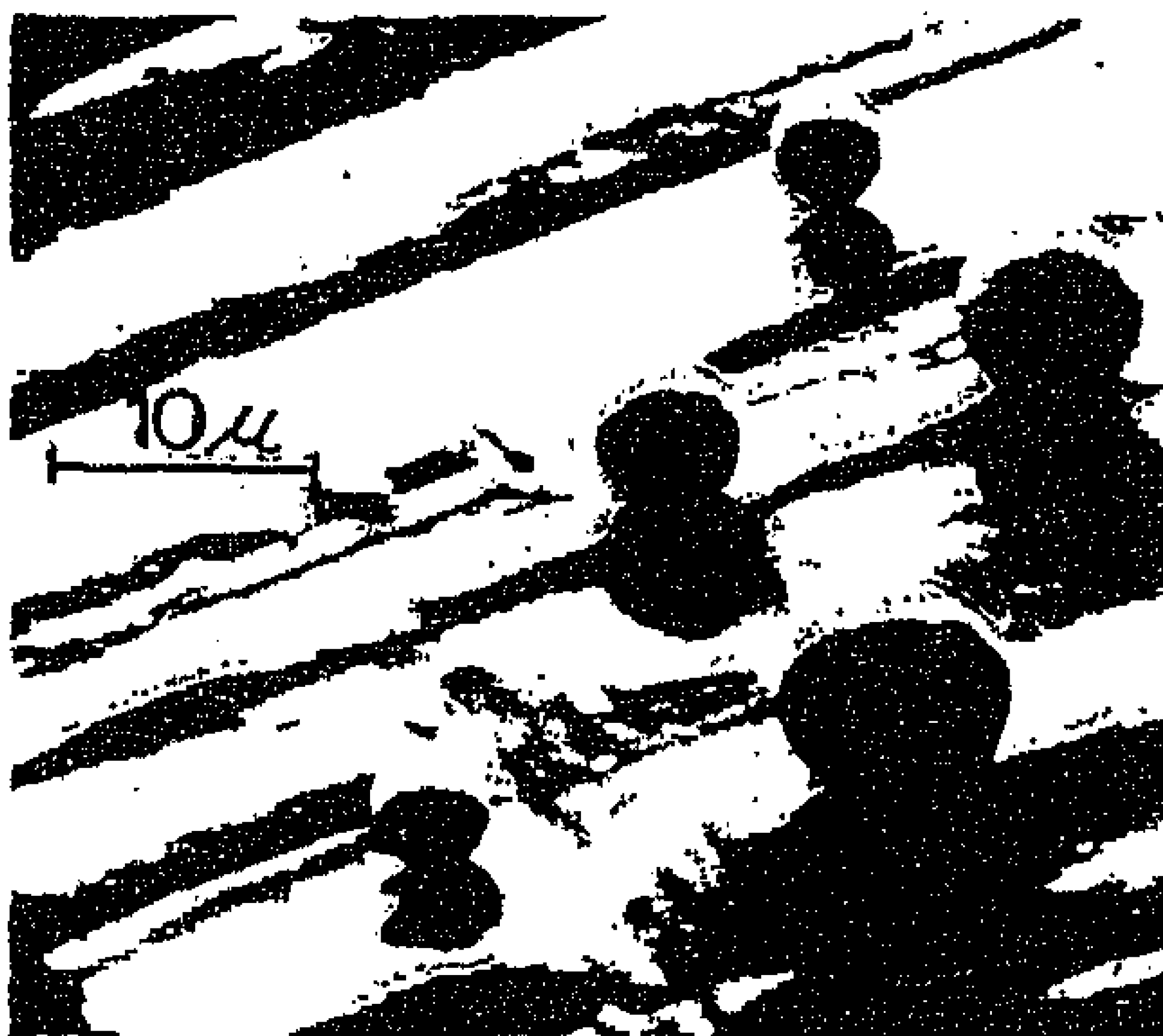
$$\upsilon = A\,(Z-C)^2 \qquad \text{............ (30-7)}$$

يمثل Z العدد الذري لعنصر النموذج و C و A ثابتان لكل نوع من الخطوط

المميزة($K\alpha$ أو $L\alpha$ الى آخره). لذلك تعطي قياسات الطول الموجي و شدة الاشعة السينية المنبعثة فكرة عن التحليل الكيماوي للعناصر الموجودة في النموذج.

وعند استخدام شدة الاشعة السينية المميزة المنبعثة من عنصر معين في تغيير شدة الحزمةالالكترونية في عارضة انبوبة اشعة المهبط (راسم الصورة) فينتج عن ذلك صورة تمثل توزيع ذلك العنصر في النموذج المفحوص.


(a)



(b)

الشكل (7-49) صورتان بالمجهر الالكتروني الماسح لدقائق من النحاس على اساس من الالمنيوم. الصورتان مأخوذتان بجهاز المجهر الالكتروني الماسح المجسم.

(a) صورة بالإلكترونات الثانوية.

(b) صورة بالإلكترونات المستطارة الى الخلف(الراجعة).

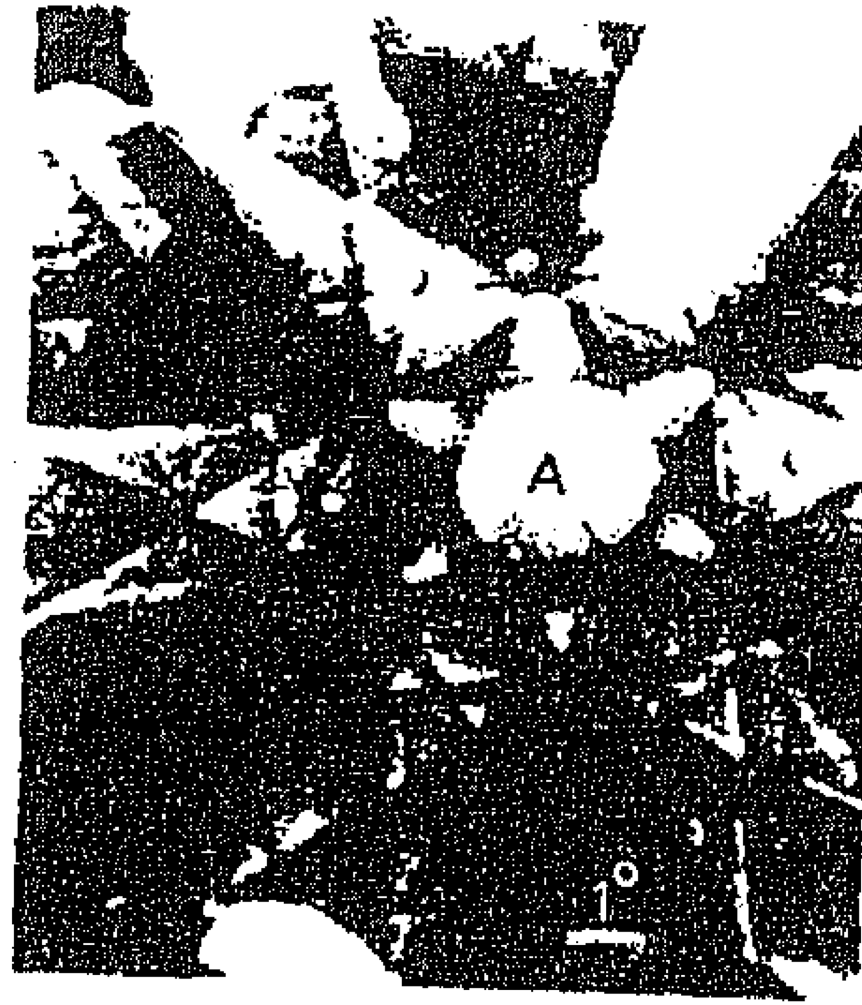
جـ- تباين المجال المغناطيسي:

إذا كان المجال المغناطيسي خارج النموذج قوي بصوره كافية (في بعض المواد) بحيث يؤثر على مسارات الالكترونات الثانوية فإن التغيير في كفاءة جمع الالكترونات الناتجة عن ذلك تعطي هذا النوع من التباين.

د- تباين اقنية الالكترونات والتباين البلوري:

يحدث هذا النوع من التباين في النماذج البلورية فقط، والذي يعطي معلومات حول التناظر البلوري وحجم الخلية الأساسية والاتجاه البلوري.

وينشأ هذا التباين لان حزمة الالكترونات الساقطة تعاني من ظاهرة الحيود عندما تدخل الى البلورة والتي تُعرف بأقنية الالكترونات ، يعتمد مقدار الاقنية في المستوى الذري الواحد على مقدار تراص ذراته والمسافة الفاصلة بين نفس المستويات. يؤدي هذا الى تغيير في انبعاث الالكترونات الثانوية عند تغيير زاوية سقوط الحزمة الإلكترونية الأساسية .يبين الشكل (7-50) نمط الاقنية الحاصل من بلورة السليكون الاحادية.




**الشكل (7-50) نمط الاقنية الخاص ببلورة احادية من السيلكون.**

## ٥-٦-٧ تحضير العينات Specimen preparation :

يتم تحضير العينات للمجهر الإلكتروني الماسح بسهولة خصوصاً بالنسبة للمواد جيدة التوصيل للكهرباء. وتتضمن العملية تنظيف النموذج ولصقه بصمغ موصل للكهرباء على قرص صغير من الالمنيوم فيه مسمار لتثبيته على قاعدة حامل العينات في المجهر ، الشكل (7-51) .



**الشكل (7-51) نماذج المجهر الإلكتروني الماسح مثبتة على حاملات النماذج الخاصة.**

يمكن استخدام نماذج ابعداها بحدود عدة مليمترات لكل بعد اما النماذج الكبيرة فيمكن استخدامها إلا أن ذلك يكون على حساب الحرية في حركة النموذج في واحد أو أكثر من الاتجاهات الثلاثة. وقد صُنعت الآن مجاهر لها حجرة نماذج كبيرة جداً قد تبلغ ابعادها 30x30x10 cm وذلك لفحص النماذج (الاجزاء) الكبيرة لااتلافياً (اي من دون الحاجة الى قطع النموذج). كما يمكن أيضاً استخدام تقنية الطبعه السطحية اللدائنية (plastic surface replica) لدراسة سطوح الاجسام الكبيرة ايضاً ويجب بالطبع ان تعامل هذه الطبعة معاملة النماذج العازلة. والأشكال الوارد في حالة المواد العازلة هي أنها تجمع الشحنة الكهربائية الواردة من الحزمة الإلكترونية الاساسية . تحيد هذه الشحنة مسار كل من الحزمة الالكترونية الاساسية والإلكترونات المجمّعة ولذا تنتج صورة مشوهه بدرجة كبيرة. لذلك يمكن طلاء النماذج العازلة بطبقة رقيقة من مادة موصلة وتكفي لذلك طبقة سمكها حوالى 20nm من الكاربون او الفضة او الذهب او اية مادة موصلة مشابهة. تتم عملية الطلاء داخل جهاز التبخير المفرّغ.

**٦-٦-٧ تطبيقات المجهر الالكتروني الماسح:**

يمكن استخدام المجهر الماسح لدراسة العديد من الخواص والصفات الخاصة بالنموذج فعلى سبيل المثال يمكن :

١- دراسة تضاريس السطح؛ وهي من أهم الوظائف الأساسية للمجهر الماسح وذلك بفضل مايتمتع به من عمق مجال عال يجعله مؤهلاً لفحص التضاريس. حيث يمكننا من الحصول على صورة بثلاثة ابعاد (مجسمة) بسرعة وبدقة عاليتين الى جانب قدرته العالية للتمييز والتكبير. فعلى سبيل المثال يمكن دراسة مكسر النماذج و السطوح المعرضة للتآكل والأكسدة والبلى بمختلف انواعه اضافة الى دراسة حجم وتوزيع الدقائق الصغيرة والأكاسيد والحجم الحبيبي وغيرها.

٢- التكوين الكيماوي:

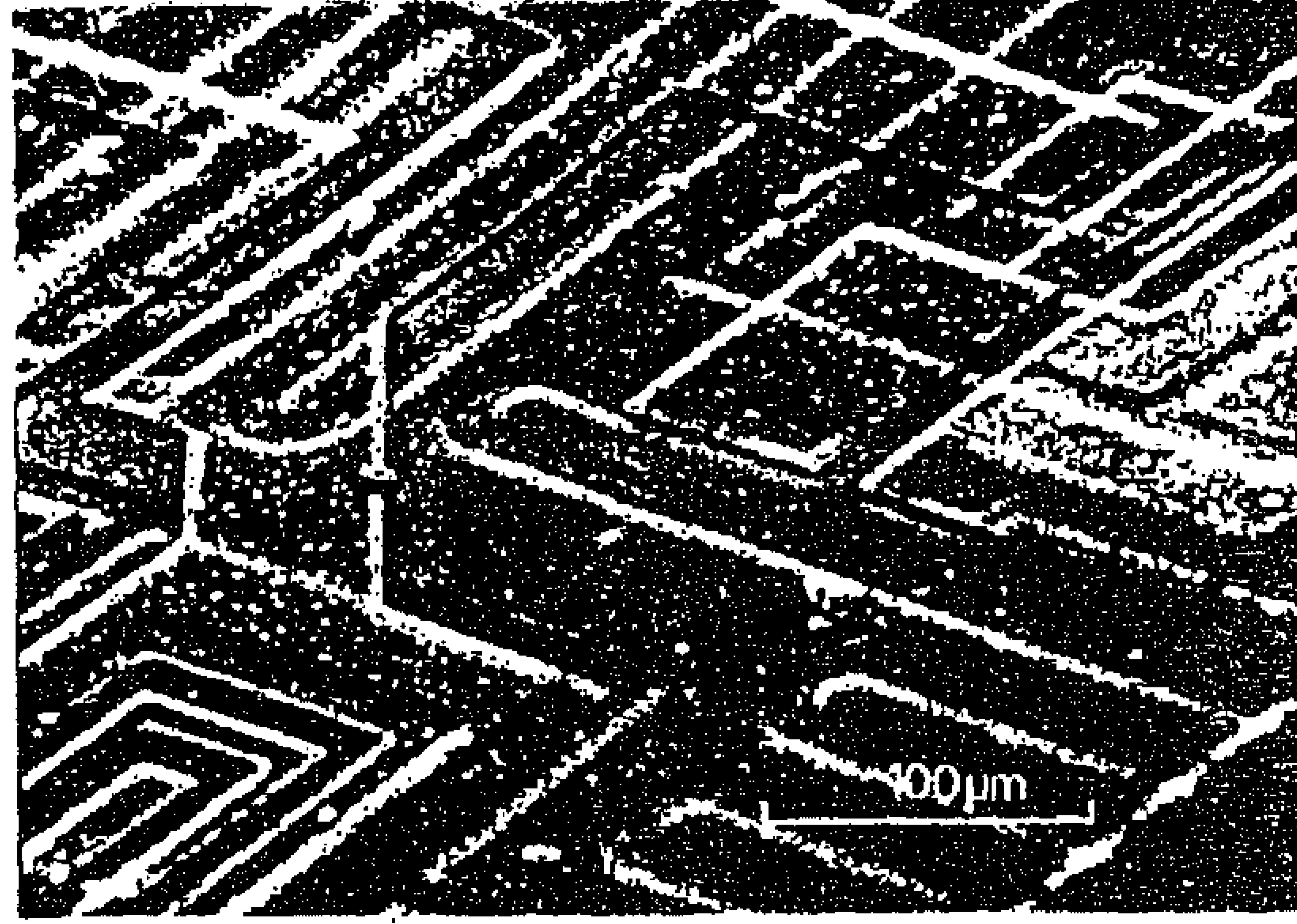
يمكن الحصول على معلومات كمية (Quantitative information) باستخدام انبعاث الكترونات اوجر (Auger electron emission) . اضافة الى مطياف الأشعة السينية حيث يمكن معرفة التكوين الكيماوي للعناصر الداخلة في تركيب النموذج وبدقة عالية.

٣- دراسة أجهزة الحالة الصلبة وأشباه الموصلات:

وتتضمن دراسة خواص مواد أشباه الموصلات (Semiconductors) وتحري تقنيات انتاج الاجهزة وفحص كل او جزء من الدائرة الالكترونية المراد تشغيلها وملاحظة الخلل او العيب ان كان موجوداً، كما في الشكل (7-52) .

٤- دراسة بعض الظواهر أثناء حدوثها( الدراسة الحركية dynamic study ).

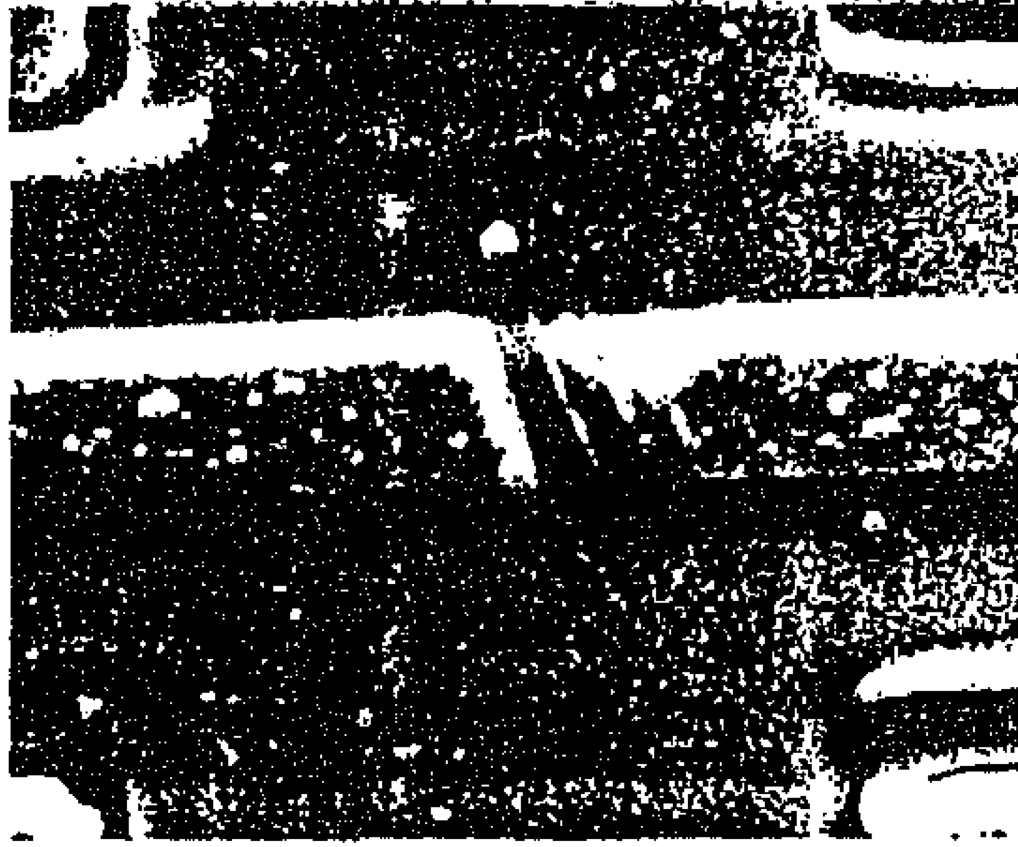
يمكن اجراء بعض التجارب في حجرة نموذج المجهر الالكتروني الماسح (على سبيل المثال التحول الطوري والتبخير واعادة التبلور وغيرها من الظواهر). وذلك لان الحيّز الواسع نسبياً لحجرة النموذج الموجودة في المجهر تسمح بتسهيلات لاجراء هذه التجارب.



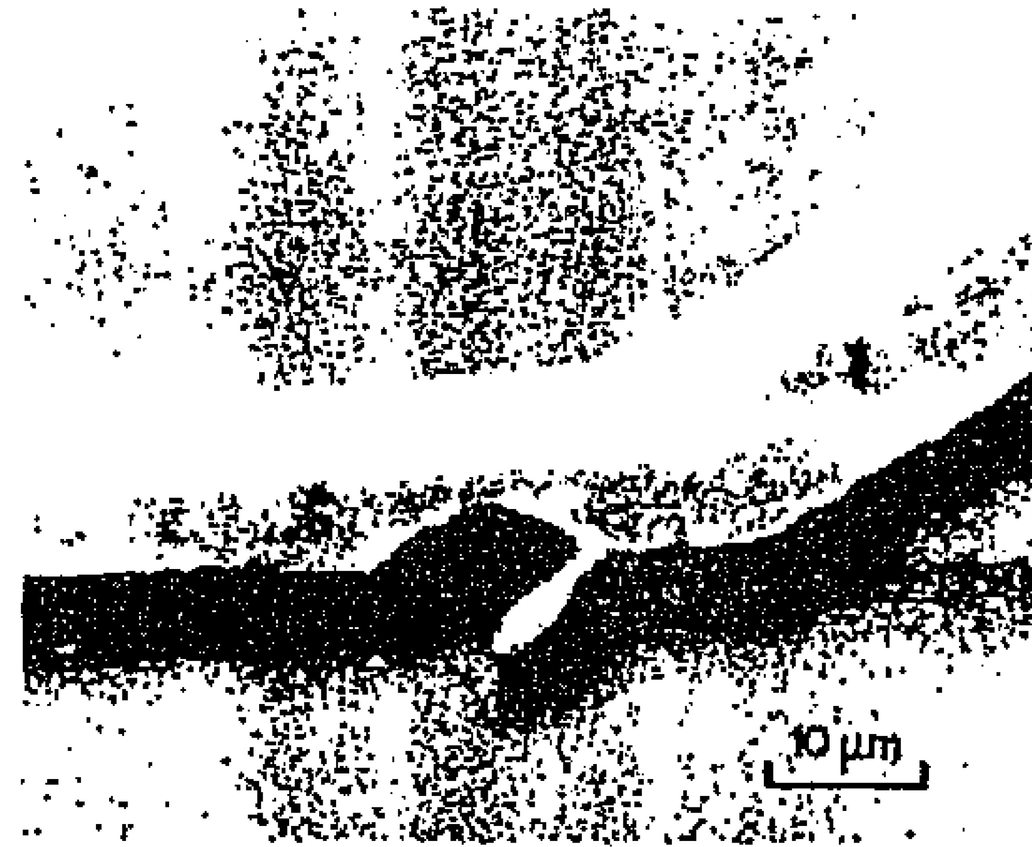

(a)



(b)



(c)




(d)

الشكل (7-52) (a) منظر عام لدائرة الكترونية متكاملة (Integrated circuit) بالمجهر الإكتروني الماسح اضافة الى انه يبين تفاصيل مختلفة للعيوب التصنيعية (b) اكتنافه على حافة الغشاء (c) تحطم الغشاء و (d) غشاء ذو عرض غير متجانس.

## ٧-٧ محلل المجس الالكتروني الدقيق (Electron - Probe Micro Analyser)

### ٧-٧-١ المقدمة:

تتوفر الآن بعض الاجهزة لتحديد وقياس التكوين الكيماوي للمواد الصلبة الصغيرة الحجم او لمناطق صغيرة في النموذج تصل الى $1um^3$. ويمكن عرض التحليل على هيئة صورة تمثل توزيع عنصر محدد في تلك المنطقة بالذات . والأجهزة التي تعتبر مجهرية التحليل (تحلل مناطق صغيرة جداً) هي محلل المجس الالكتروني الدقيق (EPMA) والمجهر الباعث للأيونات الثانوية (Scondary ion emission microscope) ومجهر اوجر (Auger microscope) ومجس الليزر الدقيق (Laser microprobe).

وأهم هذه الاجهزة هو محلل المجس الإلكتروني الدقيق، وهو حالياً الجهاز الوحيد المعول عليه لإعطاء معلومات تحليلية كمية (quantitative) ونوعيه (qual- itative) عن النموذج . وهو مصمم بشكل مشابه لتصميم المجهر الإلكتروني الماسح. ويقوم بالتحليل الكيماوي بوساطة قياس الطول الموجي والشدة للأشعة السينية المميزه المنبعثة عندما تضرب حزمة الكترونية عالية الطاقة نموذج صلب. يمكن جعل التحليل مضبوطاً الى حد 1±بالمئة من مقدار العناصر المتواجدة والتي لها عدد ذري اكبر من 12 .

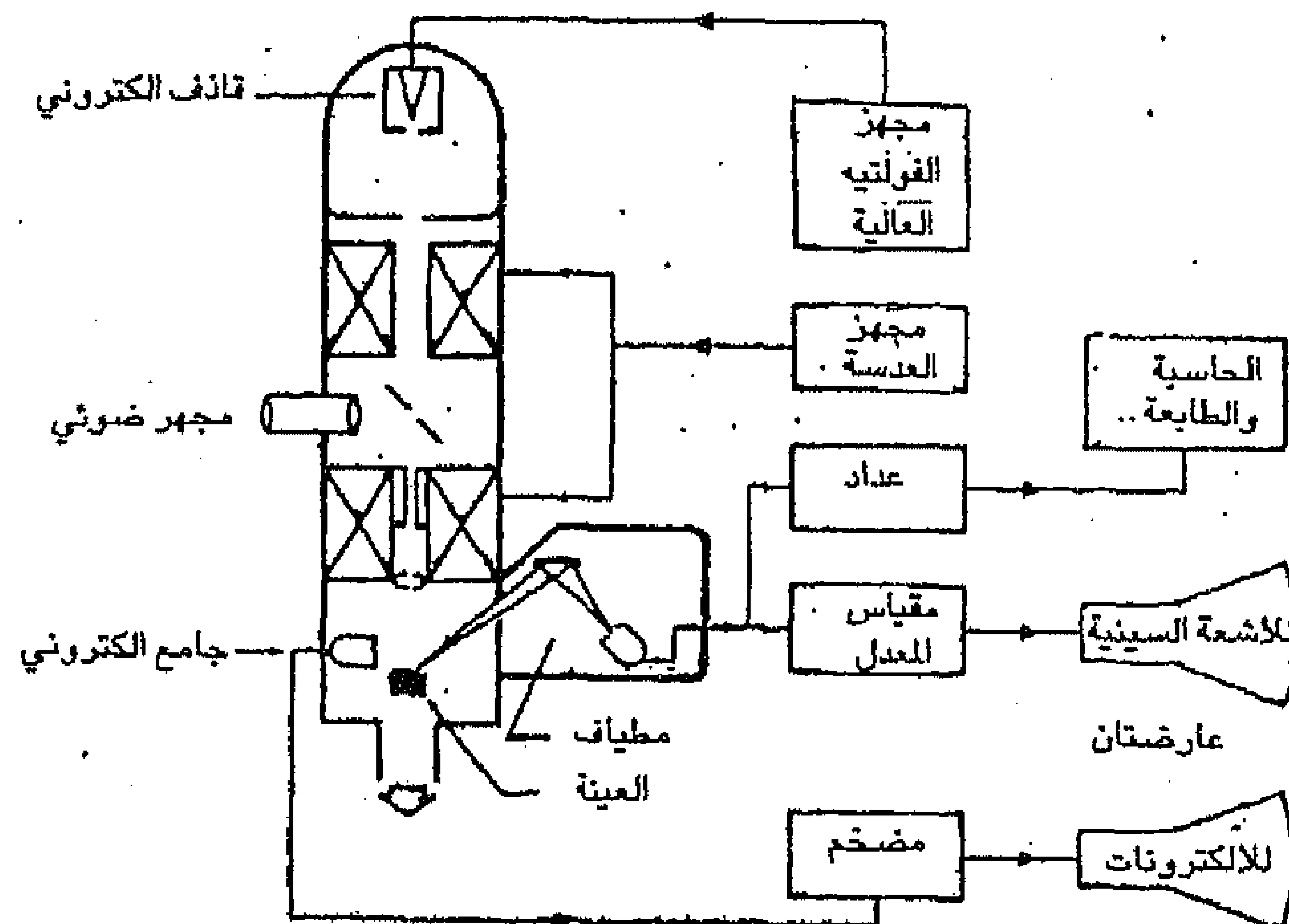
### ٧-٧-٢ محلل المجس الالكتروني الدقيق:

لقد ذُكر للتوان تركيب هذا الجهاز مشابه للمجهر الالكتروني الماسح بشكل عام. إلا أنه يتم الحصول على أحسن النتائج سواء من المجهر الماسح او المحلل الدقيق عند استخدام اجهزة منفصلة لكل على حده. فمطياف للأشعة السينية على المجهر الإلكتروني الماسح وأجهزة مسح لتكوين الصوره في المحلل الدقيق يجعل الجهازين متشابهين. والفرق الطفيف في تصميم الجهازين هي ان المجس الالكتروني الدقيق

يحتاج الى تيار الكتروني عالي واعلى فولتيه معجلة ممكنة للحصول على شدة أشعه سينيه كافية لتعطي قراءات مضبوطة ولإثارة خطوط اشعة سينيه مميزه عالية الطاقة. كما أنه من المحبذ في المحلل الدقيق ان يتم تزويده بتسهيلات لمشاهدة العينه بمجهر ضوئي، على سبيل المثال، خلال عملية التحليل، يضاف الى أنه يجب تصميم هندسة الاشعة السينية ومكان النموذج بشكل جيد لضمان أداء جيد لمطياف الاشعة السينية . إضافة الى أنه من المفضّل وضع عدة مطاييف لكل منها زاوية قطع (take off angle) عالية مهما امكن ذلك.

### ٣-٧-٧ تصميم محلل المجس الالكتروني الدقيق:

يبين الشكل (7-53) رسماً تخطيطياً لجهاز محلل المجس الالكتروني الدقيق . لقد صمم هذا الجهاز ليعطي حزمة الكترونية قطرها ليس أصغر من 0.5μm (مقارنة مع حوالي 5nm في المجهر الماسح). ولذا لاتؤخذ، عادة، احتياطات ضد الاهتزازات والمجالات المغناطيسية الشارده بقدر ما تؤخذ في حالة المجهر الماسح. تكون حدود التفريق الحجمية في التحليل الدقيق بالأشعة السينية حوالي 1μm بموجب مقدار انتشار الحزمة الإلكترونية تحت سطح النموذج.




**الشكل (7-53) رسم تخطيطي لمحلل المجس الإلكتروني الدقيق (EPMA).**

يتضمن محلل المجس الدقيق تقليدياً مجهر ضوئي لرؤية المنطقة المراد فحصها من النموذج. والواقع انه إذا أمكن تكوين صورة جيدة بالإلكترونات الثانوية فتنتفي عندئذ الحاجة الى المجهر الضوئي، مع أن المجهر الضوئي يزودنا بتباين صوري اضافي كتباين التداخل والضوء المستقطب والإضاءة المهبطية والتي تساعد على ربط التحليل الكيماوي مع البنيه الدقيقة.

## ٤-٧-٧ مطاييف الاشعة السينية X-rays Spectrometers

لقد تم التطرق الى ان هناك نوعين أساسيين من المطاييف هما (المطياف المفرق للأطوال الموجيه (WDS) والمطياف المفرق للطاقة "EDS" ويمتاز كل منهما بالآتي:

يعمل المطياف المفرق للأطوال الموجية على أساس حيود الاشعة السينية من بلوره احادية معلومة المسافة بين مستويات الانعكاس الذرية ثم تقاس زاوية براك ($\theta$) وشدة الحزم المحاده الممكنة ، ولزيادة قيمة شدة الحزم المحاده فالمطياف يجب ان :

١- يجمع الاشعة السينية خلال زاوية قطع عالية ($35^{\circ}$ الى $75^{\circ}$) وذلك لتقليل الامتصاص في النموذج .

٢- يجمع الاشعة السينية خلال زاوية صلبة عالية مهما أمكن .

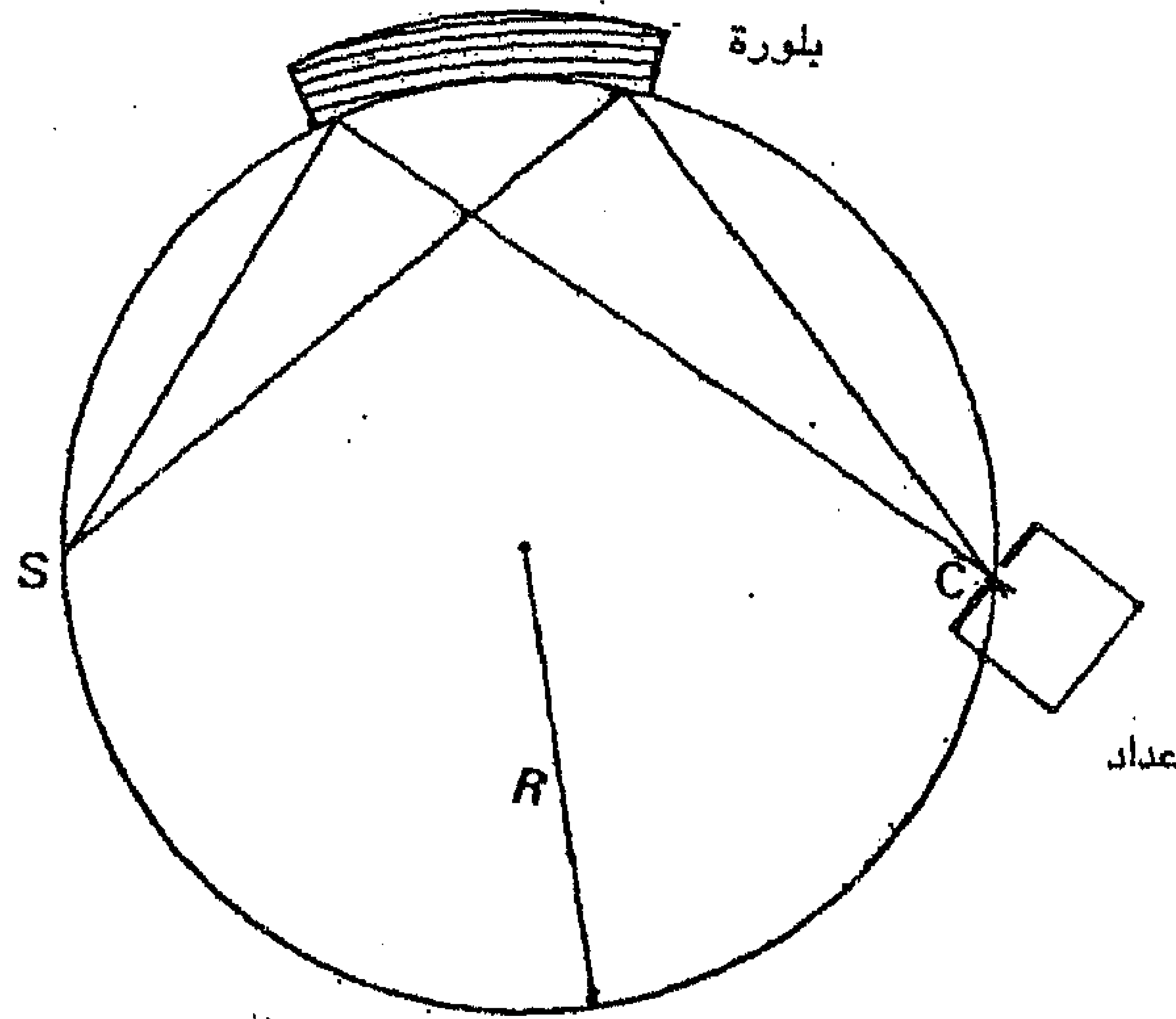
٣- يقلل الفقدان في بلورة الحيود وفي كل الطريق بين النموذج والعداد.

٤- يستخدم عداد كفؤ لقياس شدة الاشعة السينية.

٥- يكون هناك تضخيم ودقة عاليين في الدوائر الالكترونية المترتبط بها.

ومن المهم زيادة نسبة قمة النبضة الى الأساس او الإشارة الى الضوضاء (noise). ومن الضروري ضمان أن النسبة العالية الممكنة من الاشعة السينية

الداخلة عملياً في المطياف تدخل ايضاً الى عداد الاشعة السينية بعد الحيود بالبلورة. ويتم تحقيق ذلك باستخدام عملية التبئير الناتجة من الخواص الهندسية الأولية للدائرة وهي ان الزوايا المقابلة لنفس القوس تكون متساوية،وذلك عندما يكون مصدر الاشعة السينية وبلورة الحيود والعداد تقع كلها على محيط دائرة (دائرةرولاند) كما في الشكل (7-54). تتحرك البلورة والعداد حول الدائرة لتحليل اطوال موجيه مختلفة وإذا كان مصدر الاشعة وزاوية القطع ثابتين فيجب تحريك مركز الدائرة ايضاً.




**الشكل (7-54) المطياف المفرق للطول الموجي المبئر .(S) مصدر الاشعة السينية والبلورة و (c) وفتحة دخول العداد كلها تقع على محيط دائرة رولاند (Rowland) والتي نصف قطرها R . تكون البلورة منحنية الى نصف قطر مقداره 2R ثم ينعّم سطحها الى نصف قطر مقداره R لتنطبق تماماً على محيط دائرة رولاند.**

أما المطاييف المفرقة للطاقة فتعمل على أساس أن طاقة الفوتون E ترتبط مع تردد الموجه الكهرومغناطيسية ($\upsilon$) كالآتي $E=h\upsilon$ كما مرّ سابقاً. كما أن التردد له علاقة مع العدد الذري (Z) حسب معادلة موزلي (Moseley`s law) $\upsilon=A(Z-C)^2$ حيث ان C و A ثابتان.

ومن هاتين العلاقتين يمكن ايجاد علاقه بين الطاقة والعدد الذري وعليه فبقياس طاقة فوتونات الأشعة السينيه المميزة يتم تحديد العناصر الداخله في تكوين النموذج. تستخدم عادة كاشفات ذات قدرة تمييز عالية (تصنع من السيليكون المعالج بالليثيوم) في هذه الاجهزة.

تسقط الفوتونات المختلفة الطاقة الخاصة بطيف الاشعة السينية المنبعث على الكاشف في آن واحد تقريباً ويجب ان تتم عملية القياس بسرعة لتجنب التشويش. ولذا يمتاز المطياف المفرّق للطاقة في أنه يحلل ويعرض آنياً كل الأطوال الموجيه التي تقع ضمن مدى تحسس الكاشف. يمتلك كاشف السيلكون آنف الذكر (قطره من 5 الى 25mm) كفاءة عالية جداً في جمع الأشعة السينية حيث يمكن وضعه قريباً جداً من النموذج ليتم جمع الأشعة بزاوية صلبه عالية. والشيء الأساس غير المرغوب به في هذا الكاشف هو أنه يجب ان يحفظ باستمرار عند درجة حرارة منخفضة جداً (في درجة غليان النيتروجين المسال 196c- ) لانه يتلف عند درجة حرارة الغرفة. لقد طوّرت الآن بعض الكواشف بحيث أنها يمكن أن تبقى من دون تلف عند درجة حرارة الغرفة ولكن لاتعمل إلا عند درجة غليان النيتروجين المسال

وفي الحقيقة فإن نوعي المطاييف المذكورين يكمّل احدهما الآخر. فيستطيع المطياف المفرق للطاقة انجاز ثلاثة أشياء لايمكن تحقيقها في حالة المطياف المفرق للطول الموجي وهي:

١- الحصول على الطيف بسرعة عالية جداً.

٢- الحصول على النتائج المفيدة عند تيار حزمه الكترونية منخفض (وهذا ضروري بالنسبة للنماذج القابلة للكسر).

٣- الحصول على التحليل من النماذج الخشنة السطوح.

ومن ناحية اخرى يمتلك المطياف المفرق للطول الموجي دقة وقدرة تمييز عاليتين مع حدود كشف واطئة اضافة الى أداء أفضل مع العناصر الخفيفة. يعتمد اذن اختيار المطياف على نوع التطبيق. فللمطياف المفرق للطول الموجي امكانية افضل للتحليل في حين ان المطياف المفرق للطاقة يعطي معلومات تحليلية مستمرة تساعد في دراسات أخرى او عندما تكون النتائج المطلوبة شبه كمية . ولذا كان الاختيار الافضل هو المطياف المفرق للطاقة كجزء تكميلي مع المجهر الالكتروني الماسح. أما المحلل الدقيق فيشتمل عادة على عدة مطاييف مفرقة للأطوال الموجيه مع آخر مفرق للطاقة ايضاً لان الاخير يعطي نتائج اولية سريعة عن النموذج المراد تحليله.

**٥-٧-٧ التحليل الكمي بمحلل المجس الالكتروني الدقيق:**

ان الطريقة الاعتيادية للتحليل الدقيق هي مقارنة معدل العد لعنصر معين اولاً من مساحة معينه على النموذج المراد تحليله مع نموذج قياسي من عنصر نقي او مع سبيكة معلومة التكوين الكيماوي بصوره مضبوطه. وسيكون القياس العملي هونسبة الشدة بين النموذج المراد تحليله الى النموذج القياسي. وللحصول على دقة عاليه في قياس نسبة شدة الاشعة السينية المميزة يجب تفادي او استثناء بعض مصادر الخطأ كعدم الاستقرارية في الفولتيه المعجلة وزحف (حركة ) المطياف او زحف مرحلة النموذج الى ما سوى ذلك.

كما يجب مراعاة العوامل التصحيحية للقيم التجريبية لنسبة الشدة بسبب بعض المؤثرات الفيزياوية المنفصلة وهي:

١-**تصحيح العدد الذري:** ويتكون من قسمين:

أ- التصحيح الخاص بالإلكترونات المنعكسة:

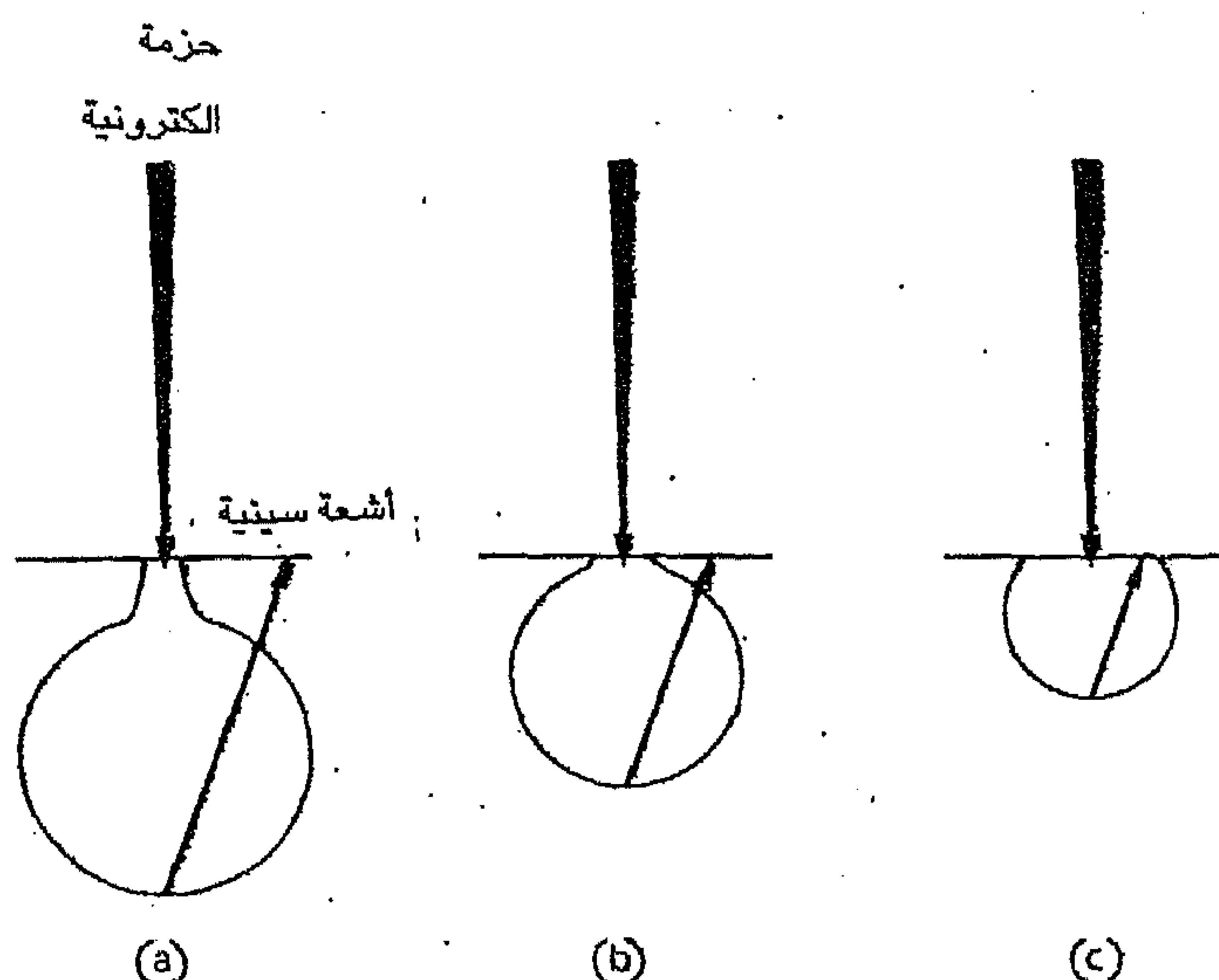
ينعكس قسم من الالكترونات الساقطة عن سطح النموذج ولذا لايستطيع توليد أشعة سينيه في النموذج. يزداد مقدار الالكترونات المنعكسة بزيادة العدد الذري للنموذج ومن ثم فهو يتناسب مع معدل التكوين الكيماوي له.

ب- تصحيح توقف القدرة stopping power correction :

يتعلق هذ العامل بكفاءة توليد الاشعة السينية وكذلك بالعدد الذري للنموذج. فيكون معدل مدى الالكترون اكبر في العنصر الخفيف إلا أن طاقة التأين بوحدة الكتلة تكون عالية ايضاً وهكذا يكون اجمالي توليد الأشعة السينية اقل.

**٢- تصحيح الامتصاص Absorption Correction :**

تتولد الاشعة السينيه عند اعماق مختلفة من سطح النموذج خلال حجم منطقة التفاعل. فتعتمد الشدة الخارجه من النموذج على مقدار الامتصاص الذي تعانيه خلال مرورها حتى بلوغها سطح النموذج. وهذا بدوره يعتمد على حجم منطقة التفاعل (بين الحزمه الالكترونية الساقطة والنموذج) وعلى امتصاص مادة النموذج، لذلك فهي تتغير مع معدل التكوين الكيماوي والطول الموجي للأشعة السينية المراد التقاطها، يبين الشكل (7-55) توليد الاشعة السينية وعلاقته بعمق منطقة التفاعل وطول طريق الامتصاص .يعتمد طول طريق الامتصاص على زاوية القطع للمطياف ايضاً.




**الشكل (7-55) رسم تخطيطي لتوليد الاشعة السينية كدالة للعمق .(a) عنصر له عدد ذري واطئ (b) سبيكه لعنصرين من (a) و (c) ، (c) عنصر له عدد ذري عال. تبين السهام مسارات الامتصاص للأشعة السينية المنبعثة باتجاه المطياف.**

## ٣- تصحيح التألق المميز Characteristic fluorescence correction :

يمكن توليد الاشعة السينية من اشعة سينية أخرى كما يمكن توليدها بالقذف الالكتروني . ينتج خط الاشعة السينية المميزة من قبل الحزمة الاساسية ومن قبل اي خط من الخطوط المميزة المنبعثة من العناصر الاخرى الموجودة في النموذج اذا كانت طاقته تكفي لذلك . يعتمد مقدار هذا التأثير على التكوين الكيماوي للنموذج.

يمكن اختصار مجمل التصحيح الذي يلزم ان يطبق بالآتي:

$$C_A = \bar{Z}\, AF \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ (31\text{-}7)$$

حيث يمثل $\bar{Z}$ معدل العدد الذري.

$C_A$ معامل التصحيح الكلي.

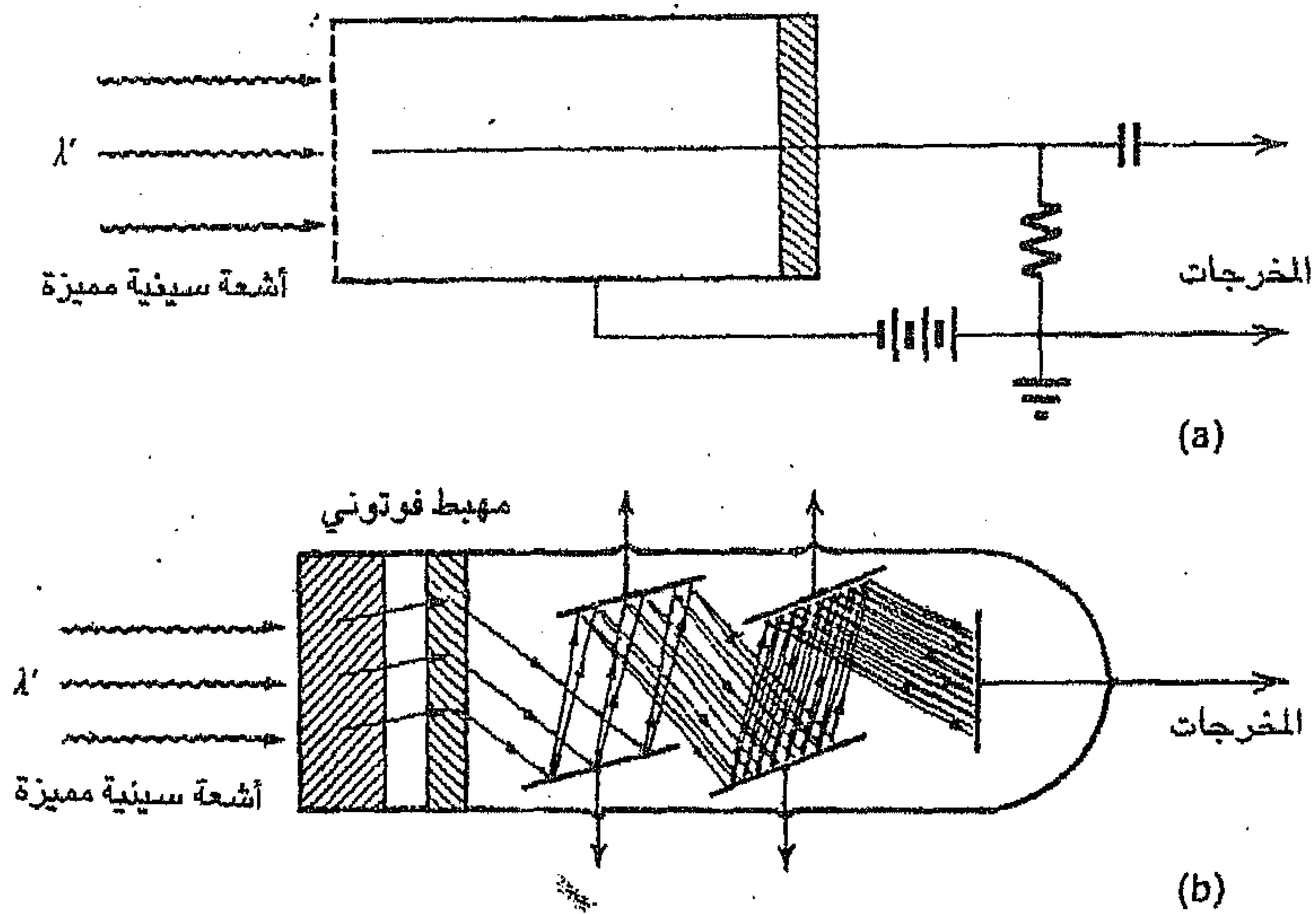
A هو تصحيح الامتصاص.

F هو تصحيح التألق (تألق الاشعة السينية).

ان تطبيق العلاقة (7-31) ليس بالأمر السهل لكنه يمكن أن تطبق بسهولة باستخدام برنامج الحاسبه الالكترونية وهو متوفر في المصادر ذات العلاقة.

**٦-٧-٧ العدادات وكشف الاشارة Signal detection And counters :**

يتشابه كشف الاشعة السينية وقياس شدتها في محلل المجس الالكتروني الدقيق لكل الاغراض العملية مع التقنية القياسية المستخدمة في حيود الاشعة السينيه وتحليل طيفها. تعتبر الاصناف الاساسية للكواشف بشكل عام من نوع العدادات التناسبية (proportional counters) ومن ضمنها النوع الغازي من العدادات التناسبية والعدادات الومضية او الكواشف المضاعفة للفوتونات كما موضحة في الشكل (7-56).

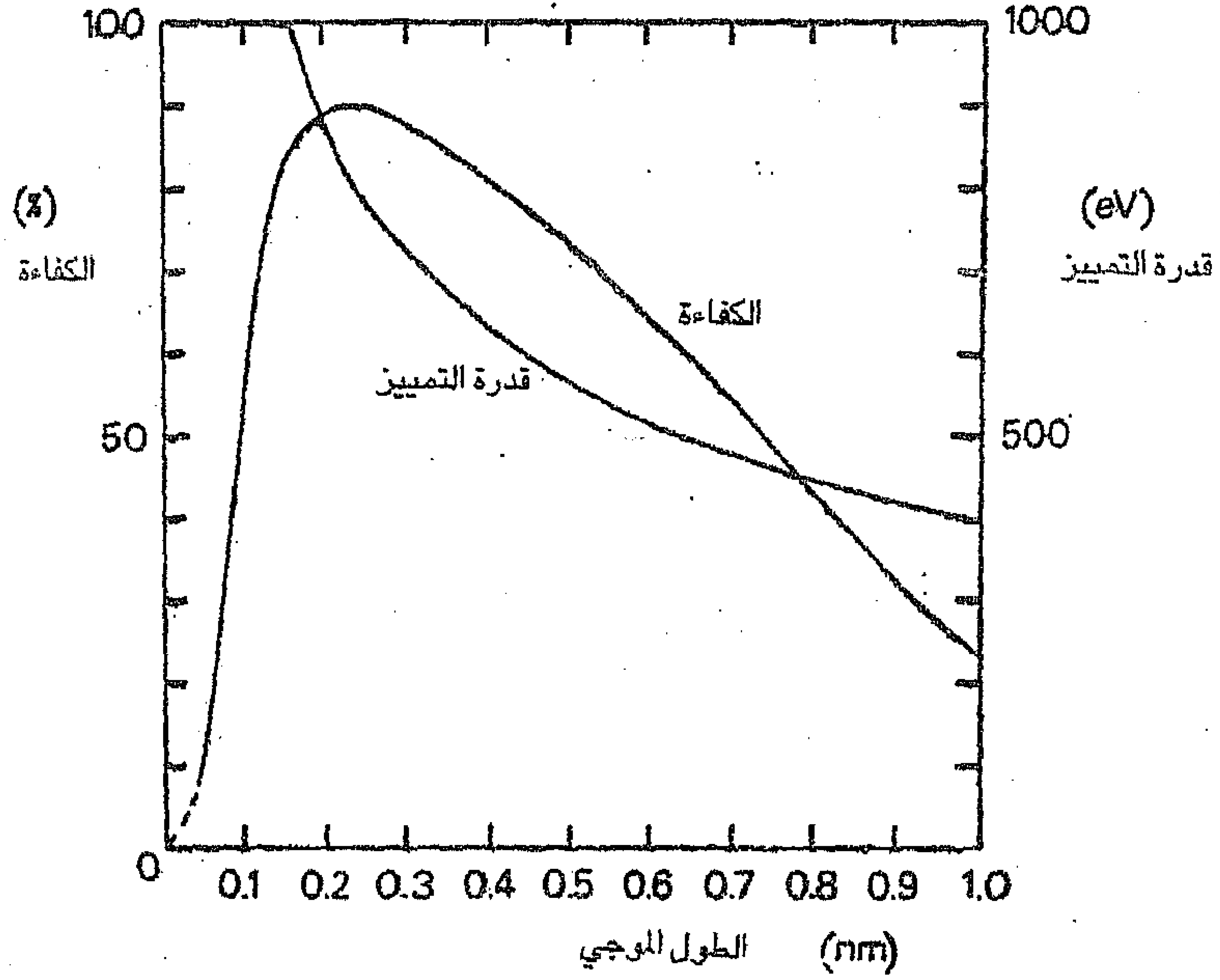



**الشكل (7-56) مخططات لكاشفي الاشعة السينية (a) كاشف الحجرة المتأينة (b) كاشف المضاعف الفوتوني الومضي.**

يُستخدم العداد التناسبي بصوره دائماً تقريباً في المطاييف المفرقة للطول الموجي. وهو ببساطة نسخة مطوّرة من عداد كايكر (Geiger counter) والذي تتعجل فيه ازواج الالكترون – ايون المتولده في الغاز الموجود ( آركون اوكزنون) نحو جدار حجرة العداد بفولتيه مناسبة وبذلك تحصل نبضة فولتيه. يتشابه هذا الأساس مع أساس عمل كاشف الحالة الصلبه المستخدمة في المطاييف المفرقة للطاقة . تكون الفولتيه المعجلة في عداد كايكر عالية بحيث ان كل الايونات تتحرك نحو جدران حجرة العداد وبذلك تولد تأين اضافي ضخم . يؤدي هذا الى نبضة قويه جداً والتي يمكن ان يتم كشفها بسهولة . إلا أنها يجب أن تُخمد قبل ان يمكن استلام نبضه أخرى (يتم ذلك إما بتخفيض الفولتيه او بوجوب بعض المضافات في الغاز المستخدم).

يختلف العداد التناسبي عن عداد كايكر أساساً في ان الفولتيه المعجلة اقل بكثير مما في عداد كايكر. فيتم الحصول على تأين اضافي اقل ومن ثم تنتج نبضه اضعف، إلا أن النبضه الآن تتناسب مع طاقة الفوتون الابتدائية وتُخمد بسرعة أكبر بحيث ان الزمن الميت (dead time) ، وهي الفترة الزمنية التي يكون فيها العداد غير حساس ، للعداد التناسبي هو حوالي 200nS مقارنه مع 50µS او أكثر لعداد كايكر.

إن كفاءة العد وقدرة التمييز للعداد التناسبي تعتمد على الطول الموجي كما مبين في الشكل (7-57) ان هذين المنحنيين موافقان للعداد المملوء بالكزنون إلا أنها تعتمد بشكل رئيس على الغاز المالىء والامتصاص الذي يحدث في شباك العداد والتصميم وأخيراً الفولتيه العاملة للعداد. يمكن استخدام الجريان المستمر للغاز في حالة معدلات العد العالية جداً، حيث يعطي هذا اخماداً سريعاً جداً للنبضة بصوره فعّاله وذلك بإزالة الغاز المتأين ميكانيكياً.




**الشكل(7-57) صفات العداد التناسبي: كفاءة العد وقدرة التمييز كدالتين للطول الموجي. المنحنيان مناسبان للعداد المملوء بغاز الكزنون (Xenon)حيث تعتمد بشدة على نوعية الغاز المالئ والامتصاص في الشباك والتصميم وعلى الفولتيه المعجلة للعداد. يمكن ان يحسن اداء العداد في حالة الطول الموجي الطويل، باستخدام الاركون بدل الكزنون واستخدام شباك خفيف جداً او حتى عداد بلا شباك.**

تولّد العدادات الومضية ايضاً نبضة تتناسب مع طاقة الفوتون الابتدائية ، فهي بذلك تتشابه من حيث الاساس بالكاشف المستخدم في المجهر الالكتروني الماسح حيث تتضمن بلوره ومضيه (حساسه للفوتونات في مدى طيف الاشعة السينية بدلاً من الالكترونات) اضافة الى مضاعف الفوتونات. فهي كفؤه جداً ويمكن أن تكون ملائمة للعد افضل، حتى عند معدلات اعلى، من العدادات التناسبيه الا ان ادائها ينخفض بصورة ملحوظة عند الاطوال الموجيه الاكبر من حوالي 200 pm (2Å) ولذا فهي لاتستخدم عادة في المطاييف المفرقة للطول الموجي . وهي في

الاساس تستخدم في مطياف اشعة كاما وفي حيود الاشعة السينية (لأن الطول الموجي هو في الغالب اقصر من (200 pm) فهي مثالية في مراقبة الحزم المحاده عند ضبط البلوره لدراسة البنى الداخليه للنموذج بوساطة الاشعة السينية. يعتمد العداد الومضي (Scintillator) على الاثارة المتألقة المرئية للأشعة السينية عند اصطدامها بمواد معينه. تتضمن هذه التقنية ببساطه مضاعفة الفوتونات المنبعثة من البلوره وذلك باخراج الكترون فوتوني من المهبط الفوتوني (photo cathode) (على سبيل المثال المركب الكيماوي المعدني لمعدني السيزيوم / الانتيمون).

## ٧-٧-٧ تطبيقات محلل المجس الالكتروني الدقيق:

يمكن ادراج اغلب التطبيقات العلميه والصناعيه للتحليل الدقيق للمواد تحت ثلاثة عناوين:

أ- دراسة عمليات الانتشار.

ب- دراسة وتمييز التحولات الطورية.

جـ- تعيين وتحديد الشظايا الصغيرة والأطوار.

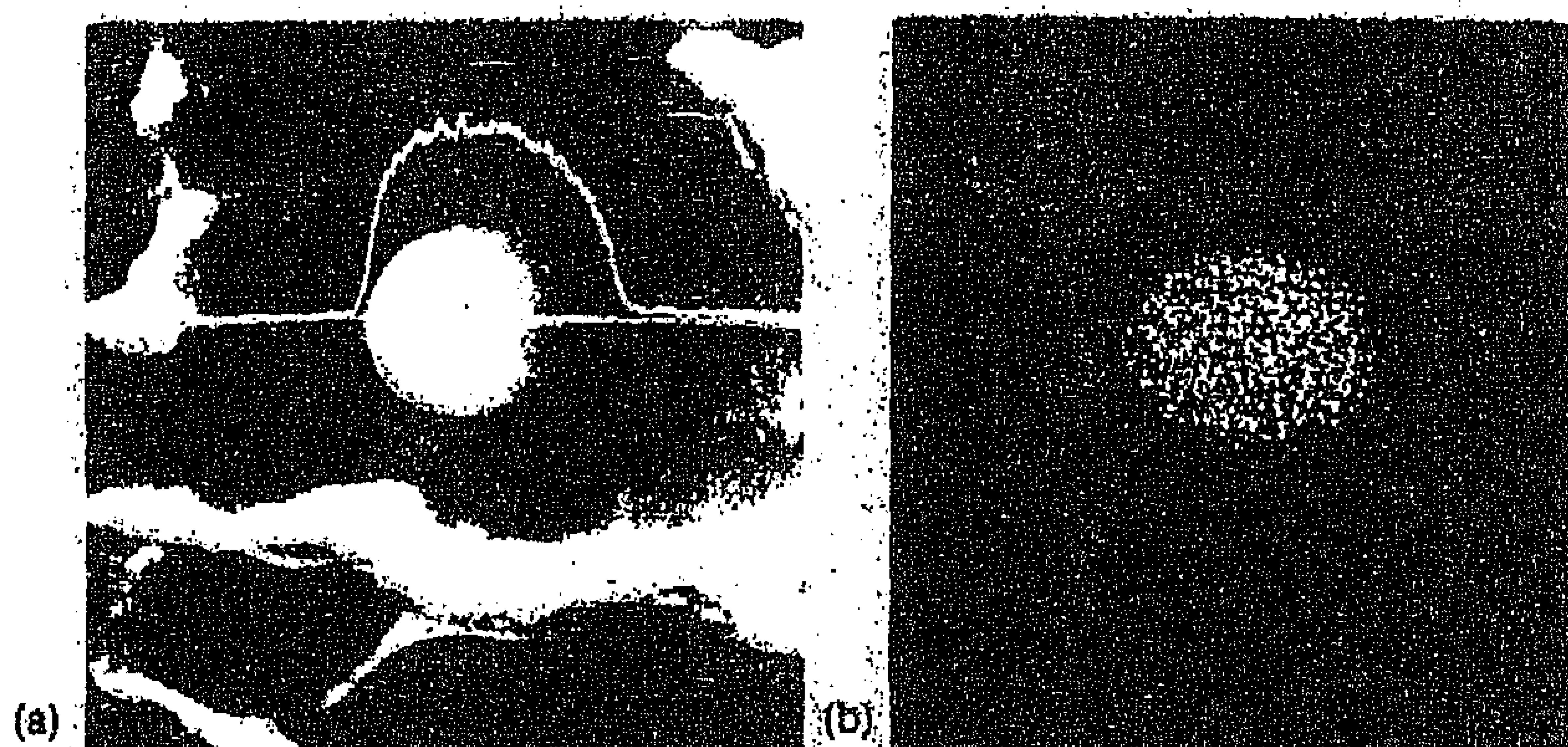
وحيث أن الانتشار هو أحد العمليات الاساسية الداخله في عمليات الانتاج والمعاملات الحرارية للمواد،فدراسته بتقنية التحليل الدقيق تشكل احدى التطبيقات الصناعية المهمة، الى جانب الاستخدامات الواضحة كالتأكد من ان عملية التلدين أدت بالفعل الى تجانس السبيكة ام لا. وهناك تطبيقات تعتمد بشكل رئيس على الطبيعة المجهرية للتحليل كدراسة روابط الانتشار الرقيقة لطبقة الطلاء الخفيفة او تلك التي بين الألياف والمادة الاساس في المواد المركبة (Composites) وكيفية تحطمها عند درجات الحرارة العاليه.

تمثل المخططات الطورية المضبوطة الإداة المساعده الاساسية للمعرفة الشاملة للبنى المجهرية للمواد الصلبه التي قد تكون معادن او خزفيات او بوليمرات او خامات معدنيه.

تزيد طرائق التحليل الدقيق بشكل كبير سرعة تعيين المخططات الطوريه . فيمكن استخدام نموذجاً واحداً لتعيين الحدود لكامل منطقة الطورين في سبيكة ثنائية ، فيتم تلدين النموذج عند درجات حرارية مختلفة ويتم اخماده ثم يُحلل بعد كل عملية

تلدين. يؤدي تعيين التكوين الكيماوي لكل طور موجود الياً الى معرفة التكوينات الكيماوية لنهايات خطوط الربط (Tie - Lines) عند تلك الدرجة الحرارية.

يعتبر تحليل وتحديد الاكتنافات الصغيرة في المواد من أكثر الاستخدامات الصناعية للمجس الدقيق لان وجود مثل هذه الالكتنافات يدل على وجود بعض المشاكل في عملية الانتاج والتي يمكن ان يتم حلها بتحديد ماهية هذه الاكتنافات (in-clusions) . وفي بعض الاحيان قد تؤثر هذه الاكتنافات على خواص المادة، على سبيل المثال، تخفّض متانة الكسر (fracture toughness) . يبين الشكل (7-58) سطح مكسر فولاذ يتضمن واحده من الاكتنافات مع تحليلها. ومع ان دراسة الاكتنافات في المعادن وخصوصاً الفولاذ قد أخذت مجالاً واسعاً من البحث والدراسة، إلا أن نفس المشاكل قد تحدث في مواد أخرى، على سبيل المثال، اكتنافات ثاني اوكسيد التيتانيوم في الياف النايلون.




**الشكل (7-58) سطح مكسر فولاذ فيه واحده من الاكتنافات (أبعادها 3x4µm) في مساحة ذات انهيار مطيلي (a) تمثل صوره بالإلكترونات الثانوية اضافة الى «ماسح خطي» حيث تمسح الحزمة الالكترونية الاكتنافه على طول هذا الخط الافقي اما الخط غير المنتظم فيمثل عرضاً لشدة خط الاشعة السينية المميزة Mnkα المتبعث عبر الاكتنافه. أما (b) فهي صورة بالأشعة السينية المميزة Mnkα المنبعثة من هذه المنطقة والتي تؤيد ان المنغنيز هو أحد المكونات الرئيسه للإكتنافه كما تبين توزيع عنصر المنغنيز خلال هذه المنطقة من النموذج.**

وإذا كانت الترسبات صغيره جداً بحيث ان الاشعة السينيه سوف تنبعث من الدقيقه (الجسيم) والمادة الاساس التي تحتها، عند سقوط الحزمة الالكترونية عليها، فيمكن في هذه الحالة استخدام تقنية طبعة الاستخلاص آنفة الذكر ففي ذلك الحل الامثل.

وفي العديد من الحالات يُعد الحصول على التحليلات الكيماوية غير كافٍ بحد ذاته فمعلومات حول التركيب البلوري تكون ضروريه وذلك يتطلب نقل النموذج الى المجهر الالكتروني النافذ للحصول على نمط حيود الالكترونات لتكتمل المعلومات . وأحسن جهاز يفي بالغرض في هذه الحالة هو مجهر الكتروني نافذ فيه محلل الكتروني دقيق (transmission electron microscope and micro-analyser) . وعندئذ يمكن الحصول على التحليل الكيماوي الكمي ونمط حيود الالكترونات لجسيمات صغيره تصل الى 100nm أو أقل من ذلك.

هناك ايضاً العديد من تطبيقات التحليل الدقيق التي ليس لها علاقة بدراسة المواد مثل التطبيقات في حقل علوم الحياة والبحوث الجيولوجيه والدراسات البيئية كتحليل دقائق الملوثات الجوية والدراسات الجنائية التي تتضمن تحديد ومقارنة القطع الصغيرة للمواد كقطع الاصباغ او الشعر وسواها.

### ٨-٧-٧ خاتمة:

ان جميع أنواع المجاهر الالكترونية ومنها TEM وSEM وما يتعلق بها كتبئير الصوره ووضوحها او تقليل اللابؤريه او الانتقال من المجال المضيء الى المجال المظلم وغير ذلك من امالة العينه او تدويرها او رفعها او تحليلها كيماوياً الى غير ذلك من العمليات الخاصة بالمجهر الإلكتروني كل ذلك قد تمت السيطرة عليه بالحاسوب (computer) . اذن فالمجاهر الالكترونية الآن كاملة الحوسبة (fully computer-ised) اي تتم السيطرة على جميع العمليات بشكل دقيق جداً وباستخدام البرامجيات (soft ware) الملائمة.

## تمارين الفصل السابع - القسم الثاني-

١- قارن بين المجهر الإلكتروني النافذ والماسح والمجهر الضوئي العاكس.

٢- ماهي أهم تطبيقات وميزات المجهر الإلكتروني الماسح في حقل هندسة المواد.

٣- ماهي آليات التباين الصوري في المجهر الإلكتروني الماسح. اشرح واحدة منها.

٤- اشرح باختصار كيف يتم التحليل باستخدام محلل المجس الإلكتروني الدقيق.

٥- لماذا يصعب تحليل العناصر ذات العدد الذري المنخفض (أقل من 12) بصوره كميه.

٦- ماهي أهم تطبيقات محلل المجس الإلكتروني الدقيق.

٧- هل توجد عدسه شيئية في المجهر الالكتروني الماسح ولماذا؟

٨- ارسم مخططاً لجهاز المجهر الإلكتروني الماسح مبيناً عليه اهم الأجزاء.

٩- ماهي الشروط الواجب توفرها في النموذج المراد فحصه بالمجهر الإلكتروني الماسح، وكيف يتم تحقيقها فيه.

١٠- ماهي التقنية المستخدمة لدراسة:

أ- تضاريس سطح نموذج مكسور وآلية الكسر.

ب- توزيع عنصر الفناديوم، ومقداره في فولاذ منخفض السبيكة (Low alloy steel).

جـ- كثافة الانخلاعات في نموذج من النحاس مشوه 20% بالشد.

د- المسافات بين المستويات الذرية في بلوره من الألمنيوم.

# الفصل الثامـــن

## الميتالوغرافيا الكميه «ستيريولوجي»

## Quantitative Metallogsaphy "stereology"

### ١-٨ المقدمة:

لاشك في ان للبنيه الدقيقة (microstructure) الدور الكبير في تحديد خواص المادة ان لم تعتبر مرآة لها . فعلى سبيل المثال فإن عدد الترسبات او حجمها او توزيعها له أثر كبير على مقاومة المادة. كما ان كثافة الانخلاعات والحجم الحبيبي والعيوب النقطية وغير ذلك من العوامل البنيويه تلعب دوراً كبيراً في تحديد الخواص.

ولهذا كان حساب هذه العوامل بدقة وتعيين مقاديرها بشكل مضبوط اي بدون انحياز (bias) نحو قيمة اعلى او اقل من المقدار الحقيقي له اهمية كبيرة لأن ذلك ينعكس على خواص المادة ومن ثم على استخدامها. وبناءً على ذلك تطور علم الميتالوغرافيا الكمية او ما يسمى بعلم قياس الاحجام او المجسمات (stereology) .

تعرّف الميتالوغرافيا الكمية بأنه فن حساب المعالم (parameters) كنسبة الطور الثاني ومعدل الحجم والمسافة البينيه وعدد الدقائق للطور المبثوث في مادة غير متجانسة كل ذلك يتم من المشاهدات المجهرية لمقطع مستو من نموذج محضّر بصوره ملائمة.

فالنتيجة اذن عرضة لتغييرات احصائية واخطاء لان هذه المشاهدات تتم لمساحات سطحية محدوده ولنماذج قليلة العدد اضافة الى أن هناك أخطاء تجريبية في كل من عمليتي تحضير النموذج والقياسات العملية.

## ٢-٨ أسس وقواعد الفحص :

بما ان المعالم المحدده بالميتالوغرافيا الكمية هي مقادير بعديه مثل الحجوم والمساحات والمسافات التي تتعلق بالطور الموجود فعلاً، فهناك ، بناءً على ذلك، تحديدات ضرورية لتجنب الانحياز سلباً او ايجاباً وهي:

١- يجب ان يكون مقطع النموذج مستوٍ ومسطح.

٢- قد لا تستخدم الشبكة المنتظمة او الخطوط المنتظمة للحساب في بنية النموذج المنتظمة عندما تكون المسافات بين الخطوط متقاربة في القياس مع التفاصيل البنيويه. ولايؤدي استخدام الخطوط او الشبكة المنتظمة في استقراء البنى غير المنتظمة الى الانحياز.

٣- يجب ان يكون مقطع النموذج والمجال المجهري له او مكان الشبكة او الخطوط غير منحاز وممثلاً لمادة النموذج. ان الوضع العشوائي للشبكة في الاماكن المحدده هي التي تكون أكثر تمثيلاً في العادة.

٤- لايؤثر شكل شبكة النقاط او صفوف الخطوط والمسافات التي بينها وقوة تكبير الجهاز على الانحياز عند تعيين قيمة الكسر الحجمي إلا أنها تؤثر في دقة القياسات.

ومن الضروري عند تطبيق قواعد الميتالوغرافيا الكمية تعيين ماهي المعالم التي يجب أن تقاس. تتضمن هذه القياسات عادة الكسر الحجمي للأطوار او المكونات والحجم البلوري والمسافة بين الطبقات والمسافة بين الترسبات ودرجة التكوير وعمق الكربنه وكثافة الانخلاعات وكثافة المسامات وغيرها من المعالم.

يجب مراعاة ما يأتي عند تطبيق هذه الطريقة او تلك:

١- تحديد ماهية معالم البنيه الدقيقة التي لها علاقة بظروف الخدمة المتوقعة او متطلبات الخواص.

٢– الى اي مدى يمكن اظهار هذه المعالم وقياسها.

٣– ماهي أكفأ وأضبط طريقة قياس.

٤– هل التقنية اليدوية ام الآلية يمكن تطبيقها لتسهيل التحليل.

٥– كم عدد النماذج الواجب قياسها واين أخذت النماذج من بين دفعات الانتاج واي اتجاه يجب ان يفحص.

٦– كيف يتم تحضير النموذج.

٧– ماهي قدرة التكبير المستخدمة.

٨– كم عدد المجالات التي يجب ان تقاس لكل نموذج.

٩– كيف يجب ان تحلل المعلومات ويعبر عنها.

١٠– ماهي الاستنتاجات التي يمكن استخلاصها.

وسيتم التطرق هنا الى بعض المعالم المهمة في الميتالوغرافيا الكميه وكيفية قياسها:

## ٣–٨ الكسر الحجمي Volume fraction (Vv)

يُعرف الكسر الحجمي بأنه نسبة حجم كل الطور الثاني (طور الفا، على سبيل المثال، الى حجم النموذج نفسه ويعبر عنه عادة اما بكسر عشري او نسبة مئوية.

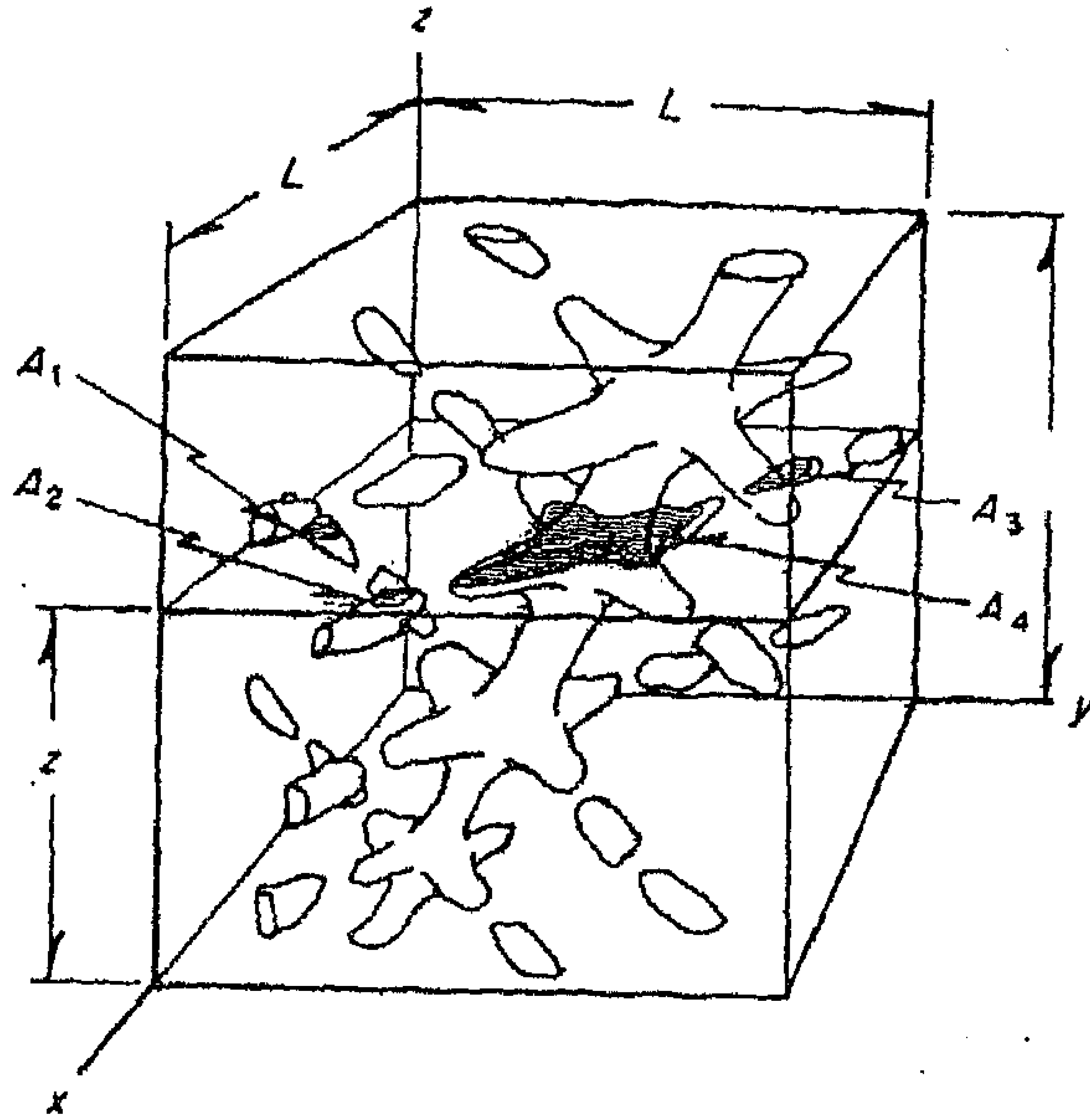
فلو فُرض انه تم اخذ نموذج على شكل مكعب طول ضلعه L ، الشكل (1-8) فيكون الكسر الحجمي Vv هو :

$$Vv = \frac{V_{\alpha\text{-phase}}}{L^3} = \frac{V_\alpha}{V} \quad \text{.............. (1-8)}$$

حيث أن:

$$V_\alpha = V_1 + V_2 + V_3 + \ldots\ldots\ldots$$

V : هو حجم المكعب. $V_\alpha$ : مجموع حجوم جسيمات الطور الثاني ($\alpha$) المنبثه في النموذج.




الشكل (8-1) نموذج مكعب الشكل طول ضلعه L يبين أشكال جسيمات الطور الثاني ($\alpha$) المنبثه فيه مع مستوى فحص قاطع له على مسافة Z حيث يبين مساحة مقطع كل جسيمه عند هذه المسافة. مجموع حجوم جسيمات الطور ($\alpha$) في هذا المكعب هو $V_\alpha$ ومجموع مساحة مقطع الجسيمات عند المستوى المشار اليه (على مسافة Z ) هو $A_\alpha$ .

## ٤-٨ الكسر المساحي Areal fraction $A_A$ :

ويُعرف بأنه نسبة المساحة الكلية لمقاطع الطور الثاني (الطور الفا) الموجود ضمن المساحة المرئية من النموذج الى مساحة المقطع المرئي من النموذج نفسه، فلو لوحظ الشكل (8-1) يكون الكسر المساحي

$$A_A = \frac{A_\alpha}{L^2} = \frac{A_\alpha}{A} \qquad \text{.......... (2-8)}$$

حيث أن :

$A_\alpha$ هي مجموع مساحة مقاطع الطور الفا ($\alpha$) الموجود في المساحة الكلية لسطح النموذج ($L^2$) المرئية .

## ٨-٥ الكسر الخطي $L_L$ Lineal fraction:

هو نسبة مجموع الاطوال المقطوعة من الطور الثاني ($\alpha$) في مستوٍ ما من النموذج بوساطة خط ذو طول معلوم الى طول ذلك الخط ($L$)، كما في الشكل (8-2) أي أن :

$$L_L = \frac{L_\alpha}{L} \quad ........... (3-8)$$

حيث أن :

$$L_\alpha = L_1 + L_2 + L_3 + ...........$$

$L$ طول خط القياس .

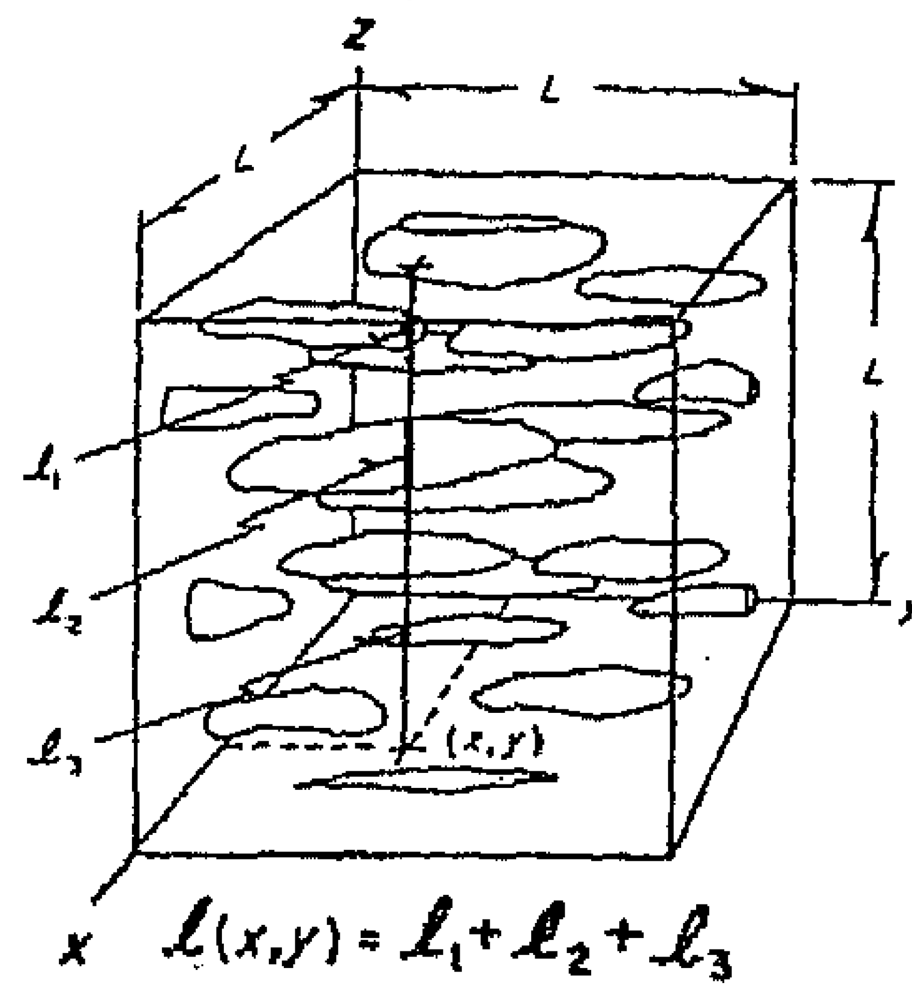
$L_\alpha$ مجموع اطوال تقاطعات الطور الثاني $\alpha$ مع الخط ($L$) .

## ٨-٦ الكسر النقطي ($P_P$) point fraction :

إذا تم وضع نقطه بصوره عشوائية خلال حجم النموذج الذي يتضمن جسيمات من الطور الثاني ($\alpha$) ، فالإحتماليه التي بها تقع تلك النقطة على الطور الثاني تمثل الكسر النقطي والذي يساوي الكسر الحجمي للطور الثاني أيضاً. وبنفس الطريقة اذا وضعت نقاط على مقطع مستو من النموذج بصوره عشوائية فالاحتمالية في ان تقع هذه النقاط على الطور الثاني يمثل الكسر المساحي وبنفس الطريقة اذا كانت النقاط موزعة على خط ما فالاحتمالية تساوي الكسر الخطي. هذه الاحتمالية تمثل الكسر النقطي اي أن:

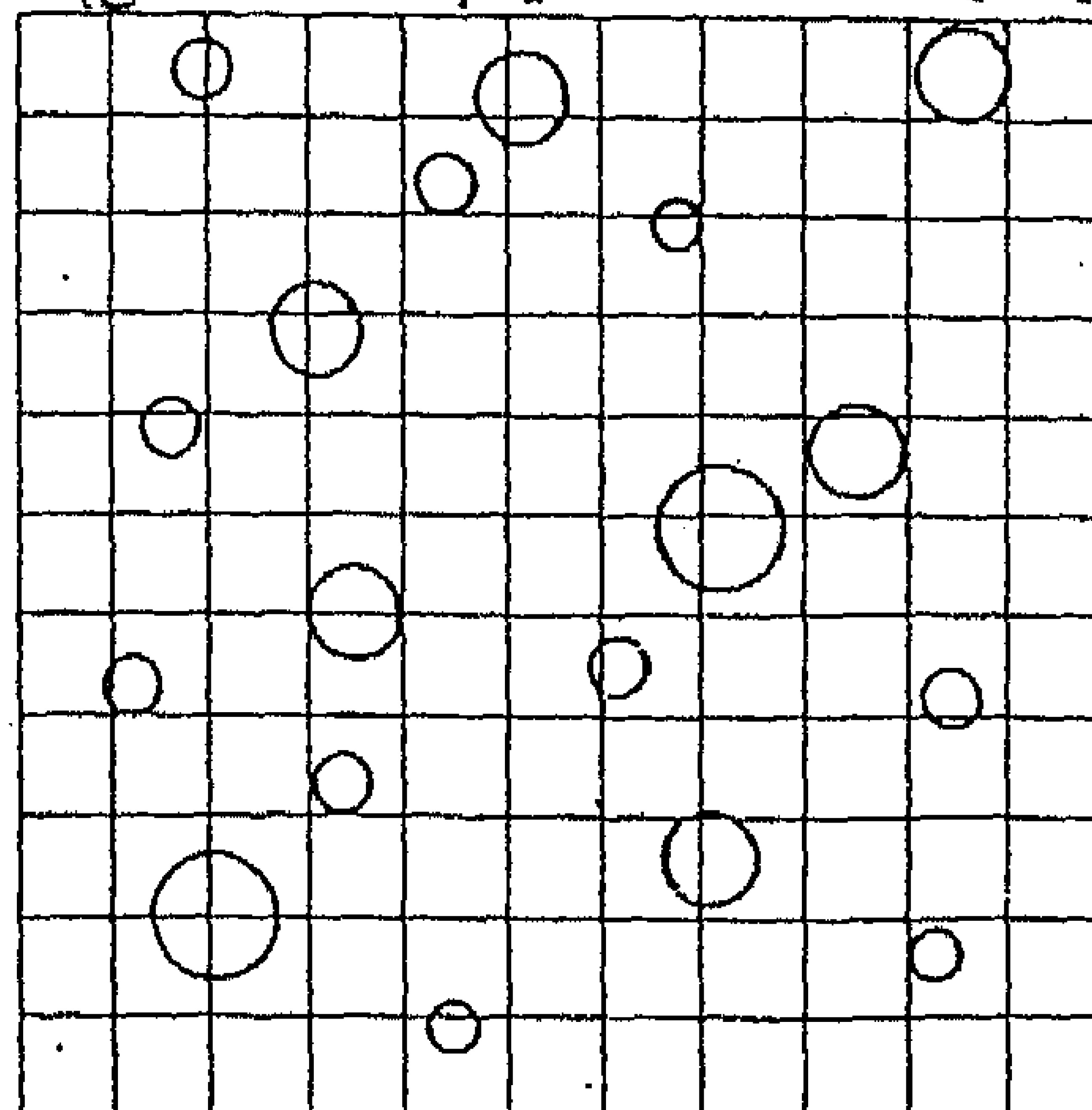
$$P_P = V_V = A_A = L_L \quad ........... (4-8)$$

وقد تم اثبات العلاقة الاخيرة (8-4) رياضياً في الكتب المتخصصة في الميتالوغرافيا الكميه والمذكور قسم منها في نهاية الكتاب.




**الشكل (8-2) يبين نموذج مكعب مع بنيته بثلاثة أبعاد اضافة الى خط فحص طوله (L) اي بقدر طول ضلع المكعب. ان مجموع اطوال خط الفحص المار بالطور الثاني ($\alpha$) يتغير مع قيمة الاحداثيين x و y عند تقاطع خط الفحص (موازي الى z ) مع مستويهما. ان مجموع اطوال خط الفحص القاطع للطور الثاني هو ($L\alpha$) او L(x,y) .**

مثال: يمثل الشكل (8-3) رسماً تخطيطياً لجزء من سطح عينه فيها الطور الثاني على هيئة دوائر منتظمة إلا أنها غير متجانسة من حيث المساحة او التوزيع، وقد وضع عليه شبكة منتظمة الخطوط والنقاط (تقاطعات الخطوط الطولية والعرضية). جد الكسر الحجمي بوساطة التحليل المساحي والخطي والنقطي إذا علمت ان مساحة الجزء الكلية $A_T = 12100mm^2$ ومقدار الطول الكلي للخطوط الطولية والعرضية $L_T = 2200mm$ وعدد النقاط الكلية (نقاط التقاطع) $P_T=100$ .




**الشكل (8-3) رسم تخطيطي لجزء من سطح عينه يشاهد فيه الطور الثاني($\alpha$) على هيئة دوائر منتظمة.**

١- التحليل المساحي:

$$V_{V\alpha} = \frac{\Sigma A_\alpha}{A_T} = \frac{\text{مجموع مساحة الدوائر}}{\text{المساحة داخل الاطار}}$$

$$= \frac{894.75}{12100} = 0.073$$

التحليل الخطي:

$$L_{L\alpha} = \frac{\Sigma L_\alpha}{L_T} = \frac{\text{مجموع اطوال الخطوط التي تقطع الدوائر}}{\text{طول الخطوط الكلي}}$$

$$= \frac{1523}{2200} = 0.069$$

التحليل النقطي:

$$P_{P\alpha} = \frac{\Sigma P_\alpha}{P_T} = \frac{\text{عدد النقاط الواقعة على الدوائر + نصف عدد النقاط المماسه}}{\text{عدد النقاط الكلي}}$$

$$= \frac{5+2x\frac{1}{2}}{100} = 0.06$$

ومن هنا يتبين ان الكسر المساحي لايساوي الكسر الخطي او الكسر النقطي إلا ان هذه المقادير تقترب من بعضها إذا أخذت قراءات كثيره (أي عدة مجالات) ولمقاطع عديده من النموذج وفي هذه الحالة يقل الخطأ و تكون النتائج اقرب الى الواقع ايضاً.

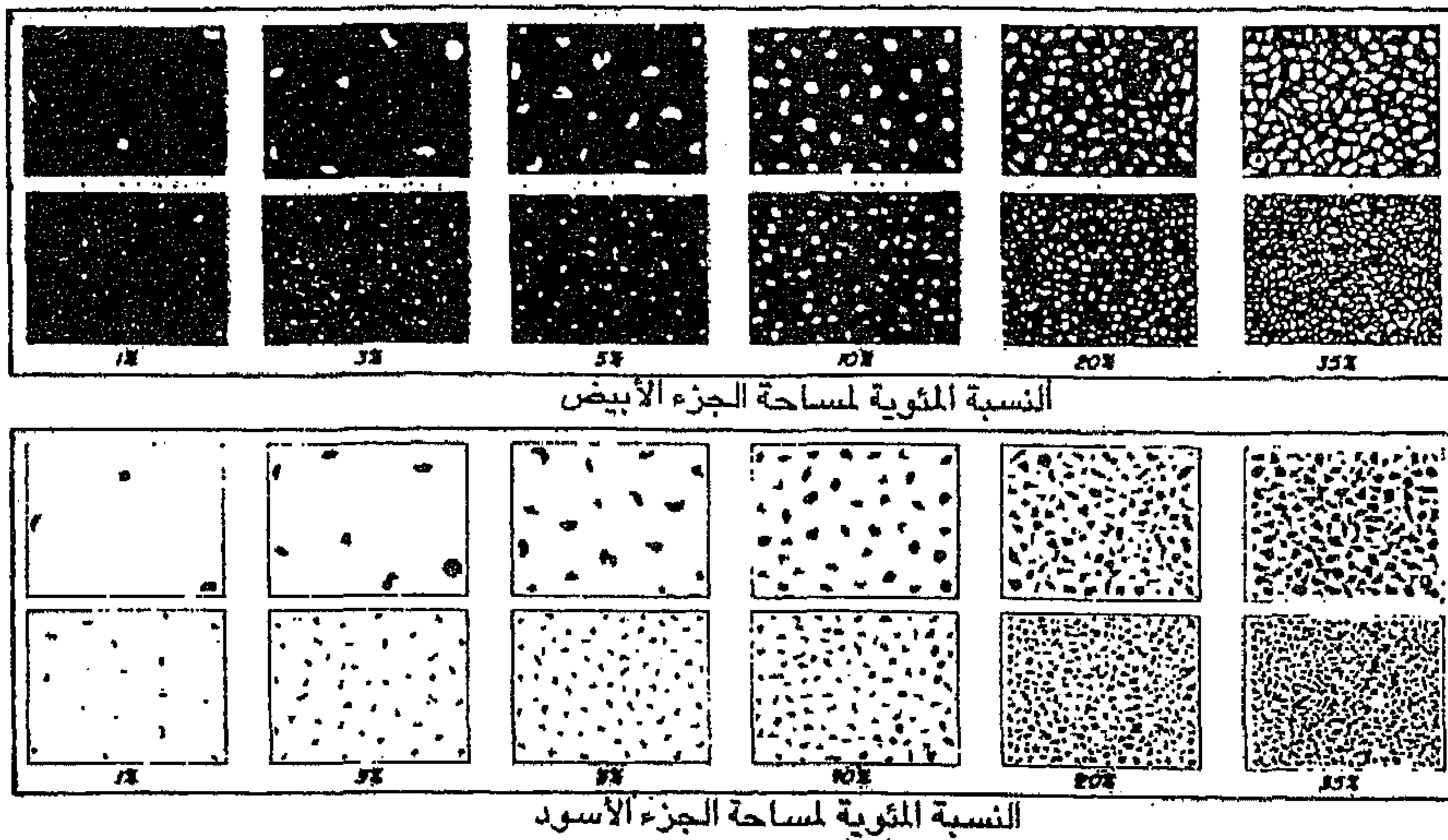
يمكن تنفيذ حساب الكسر النقطي ($P_P$) بعدة أساليب (اضافة الى التحليل المساحي والتحليل الخطي) وهي:

١- استخدام سلسلة نقاط واقعة على خط واحد وموزعة عشوائياً.

٢- استخدام سلسلة نقاط واقعة على خط واحد وموزعه بشكل منتظم.

٣- استخدام عدد من النقاط واقعة ضمن مساحة (ذات بعدين) وموزعة بصوره عشوائية.

٤- استخدام عدد من النقاط واقعة ضمن مساحة (ذات بعدين) وموزعة بصوره منتظمة . يبين الشكل (8-4) لوحات قياسية لتخمين الكسر الحجمي بطريقة المقارنة.




**الشكل (8-4) لوحة لتخمين الكسر الحجمي وقد طوّرت من قبل الباحث نيلسون (Nelson).**

## ٧-٨ قياس الحجم الحبيبي (البلوري) Grain size Measurements

هناك العديد من القياسات يمكن استخدامها للتعبير عن الحجم الحبيبي وحسب تعريفه وهي:

- معدل القطر.
- معدل المساحة.
- عدد الحبيبات (البلورات) في وحدة المساحة.
- عدد الحبيبات (البلورات) في وحدة الحجم.
- معدل القطر اعتماداً على معدل حجم الحبيبة.

وبناءً على ذلك يمكن استخدام عدة طرائق لقياس الحجم الحبيبي:

١- طريقة المقارنة مع حجوم قياسية (وهي الطريقة المنسوبة الى الجمعية الامريكية للفحص والمواد القياسية (ASTM).

٢- الطريقة المساحية (طريقة جفريز Jeffries).

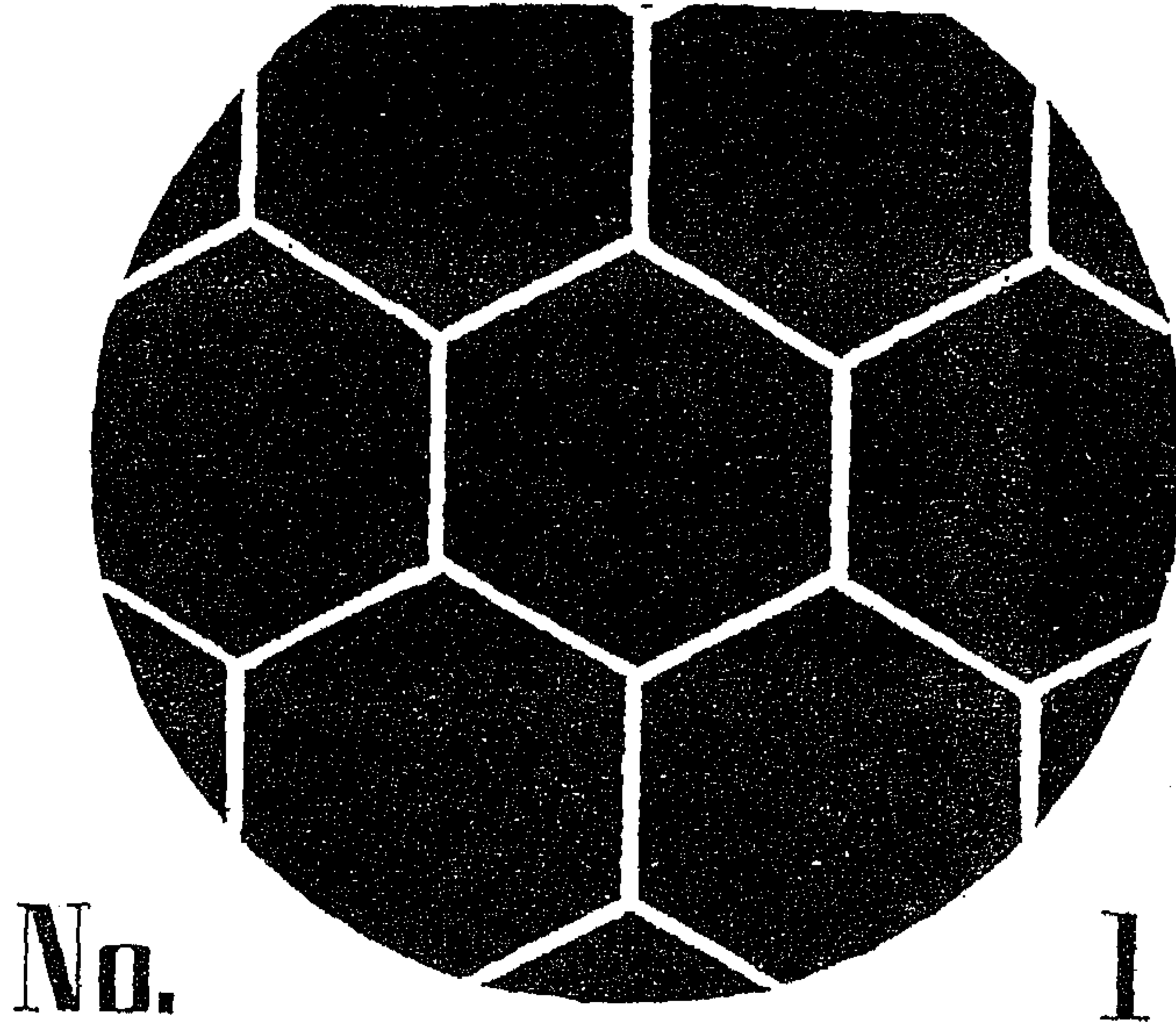
٣- طريقة التقاطع الخطي (طريقة هاين Heyn).

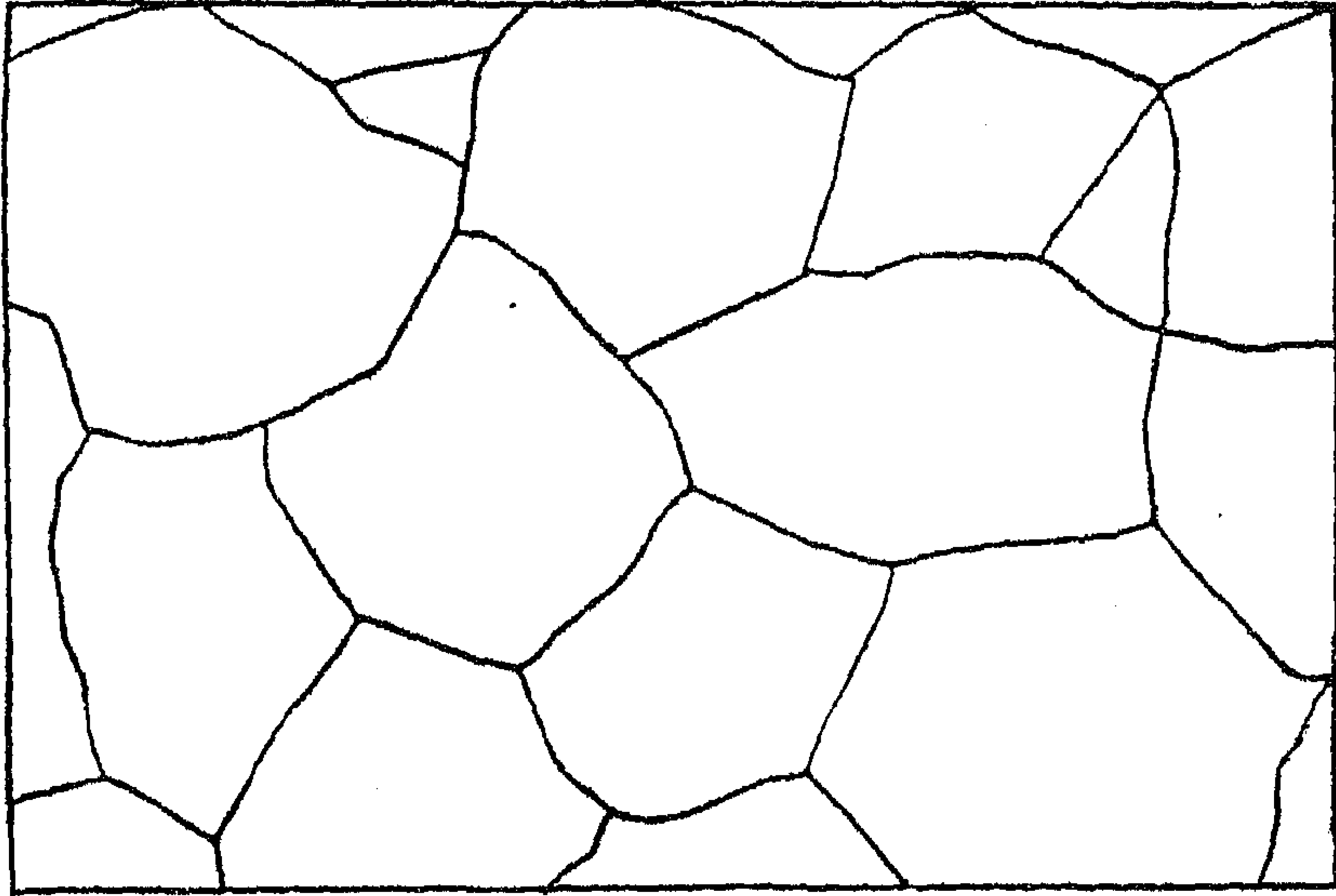
وهناك طرائق أخرى اقل شهرة من الطرائق آنفة الذكر إلا أنه سيتم التطرق الى الطرائق الثلاث المذكورة فقط.

**١- طريقة ASTM :**

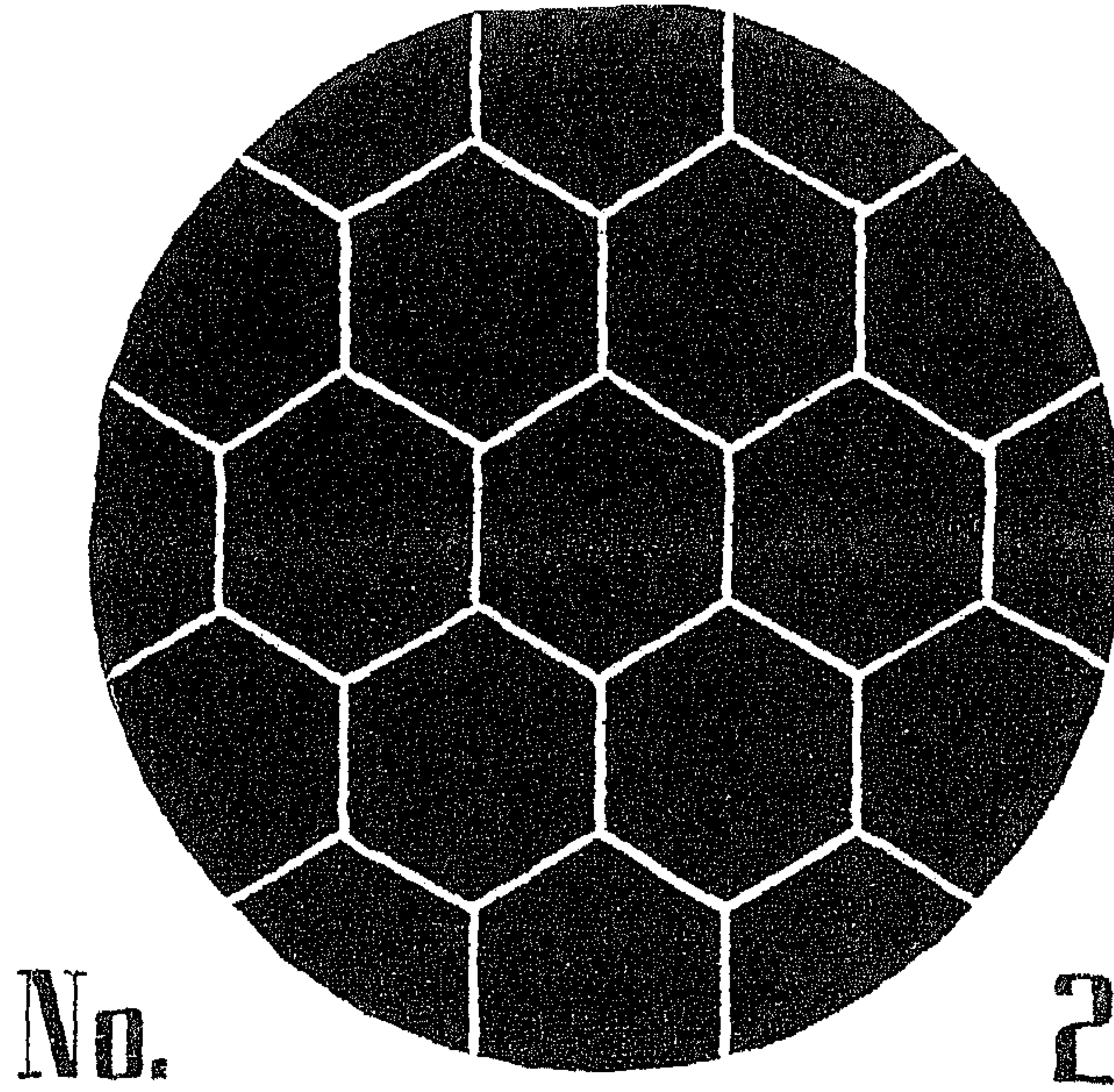
يمكن تحقيق هذه الطريقة اما بالمقارنة فقط مع شبكات قياسية ذات عيون مختلفة القياس لتتلائم مع البنيه الدقيقة وتكون هذه الشبكات ذات عيون سداسية منتظمة او غير منتظمة العيون. حيث يمثل الشكل (8-5) (h,g,f,e,d,c,b,a) ثمانية نماذج منها وهي الشبكات التي تقع حجوم حبيبات المعادن والسبائك ضمنها عادة.

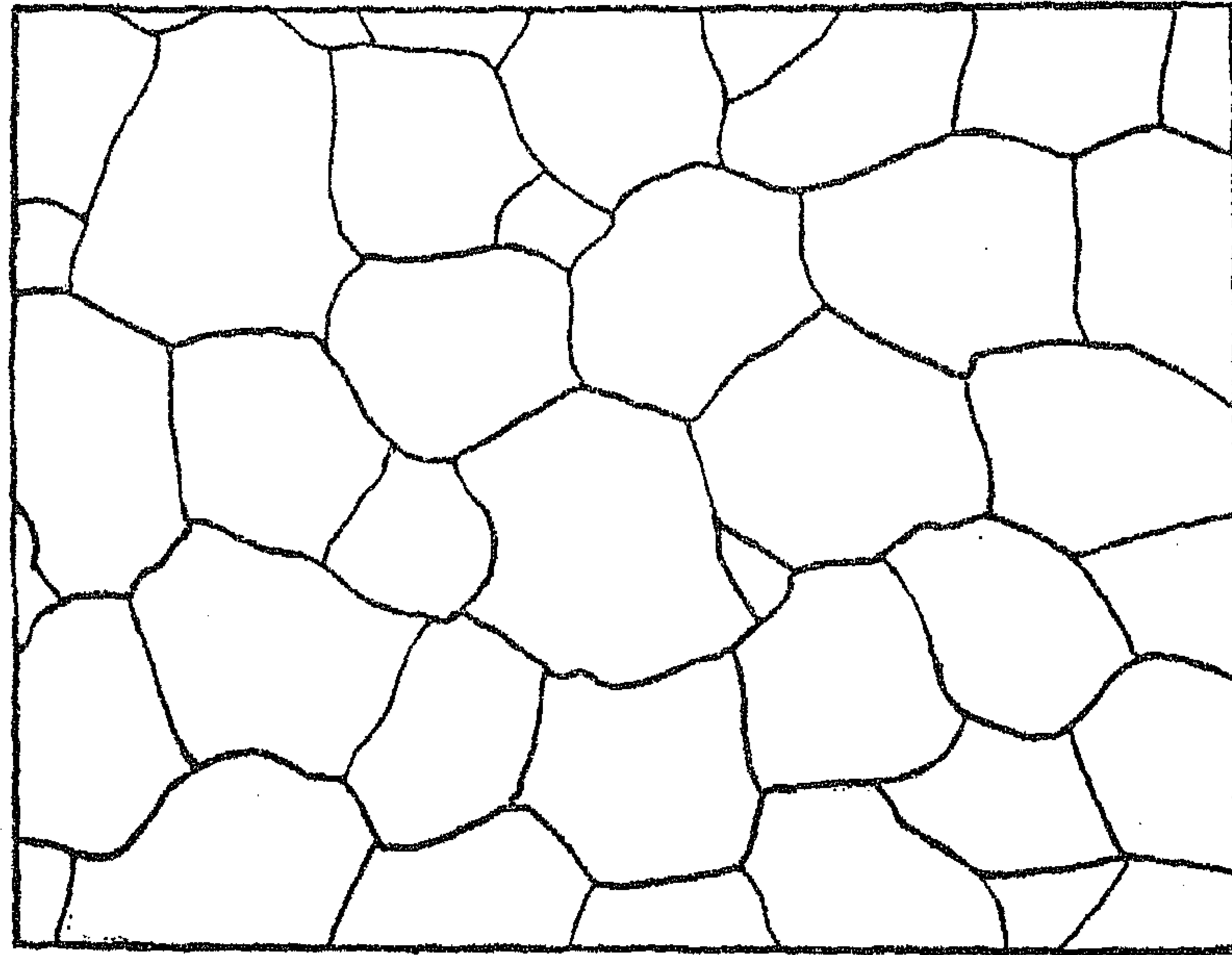
الشكل (8-5) شبكات الحجم البلوري ASTM القياسية لاحجام مختلفة (h,g,f,e,d,c,b,a)للسبائك الحديدية.



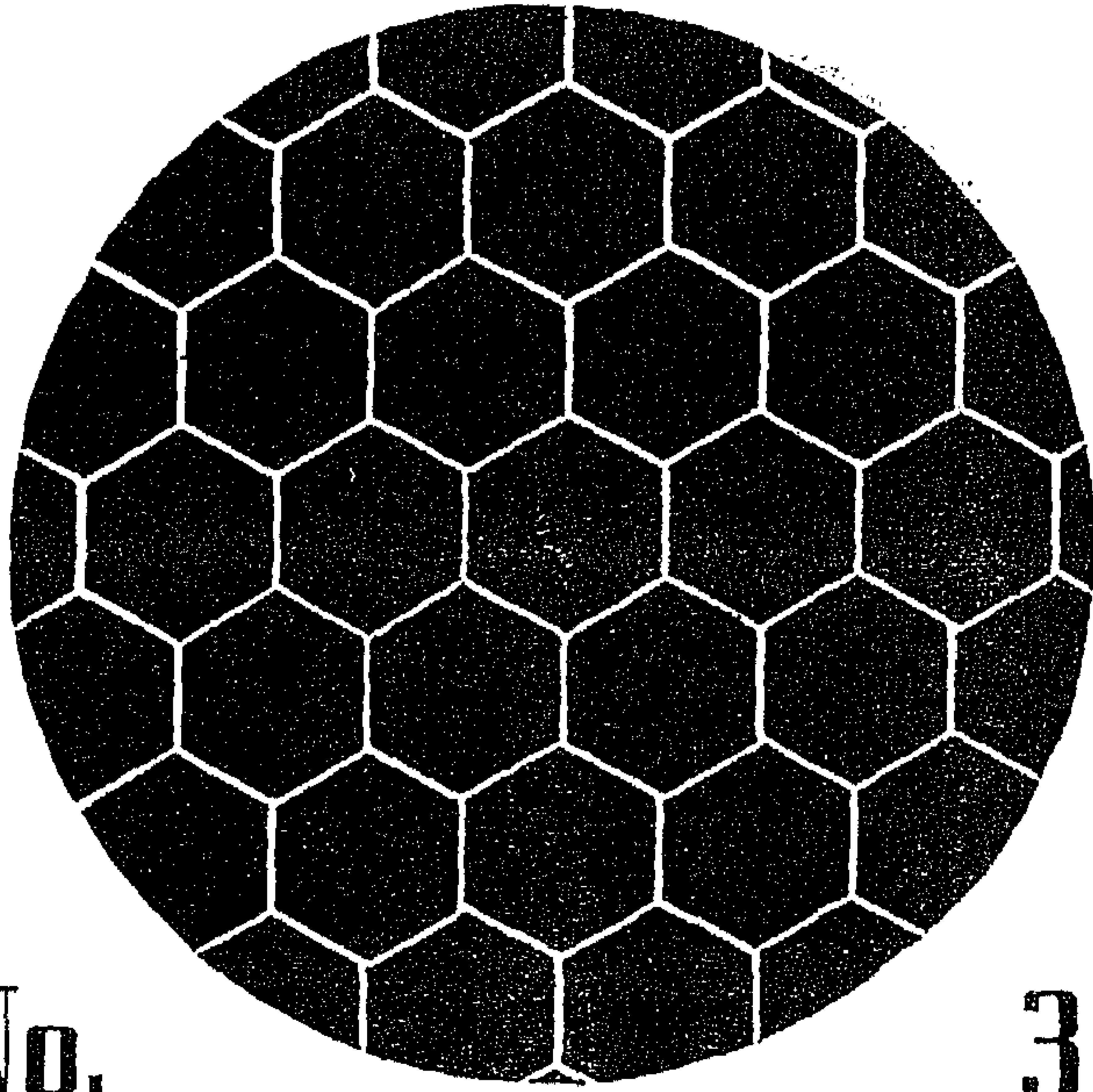



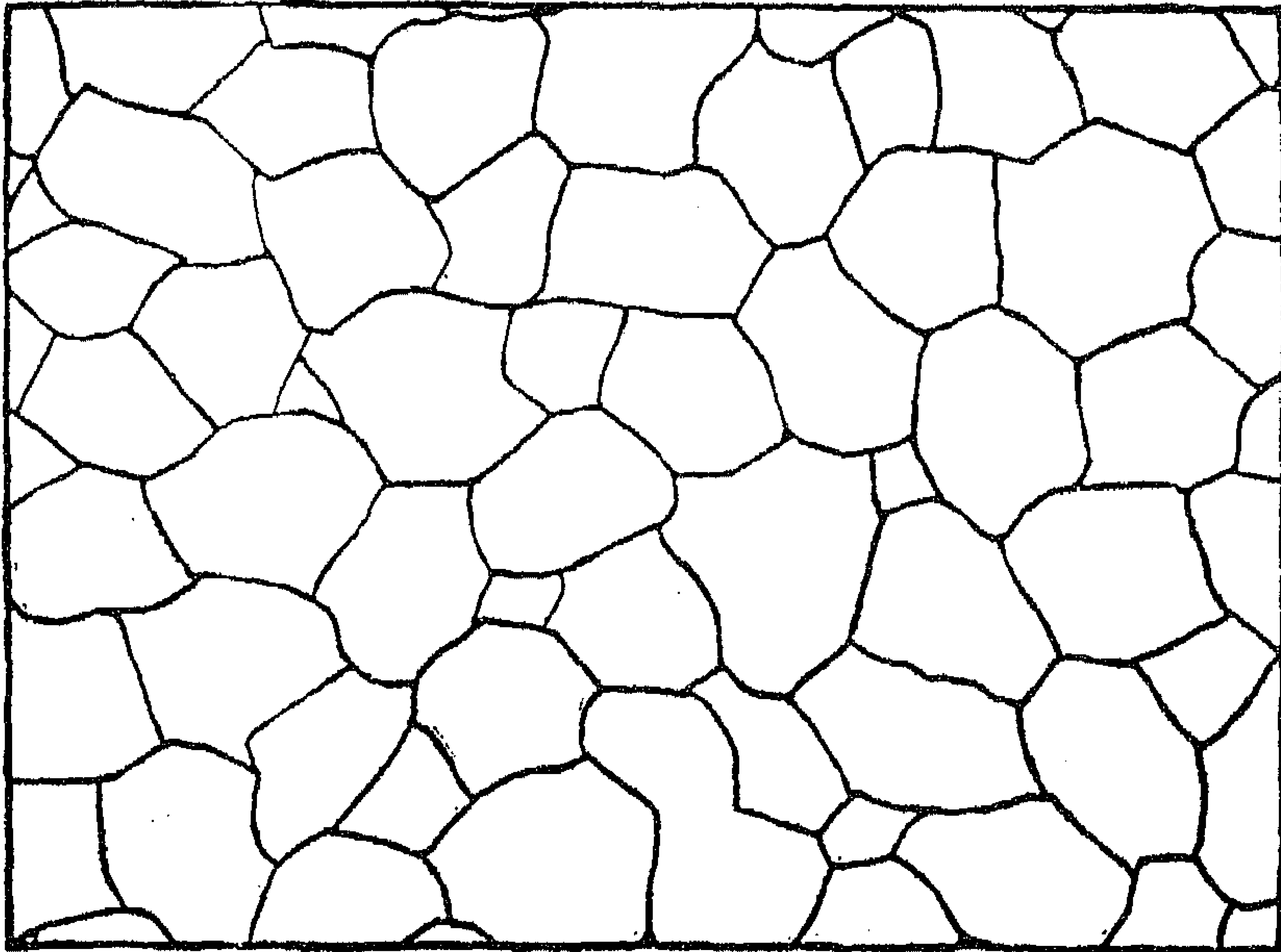
(a) يمثل النموذج الاعلى شبكه سداسية مثالية لمعدل حجم حبيبي رقم (1) في تدرج ASTM ويمثل حبيبه واحدة بالانج المربع الواحد. أما الشكل فيمثل حجم حبيبي قياسي برقم (1) في تدرج ASTM وعدد الحبيبات في الانج المربع يصل الى $1\frac{1}{2}$ عند تكبير مئة ضعف (100X)



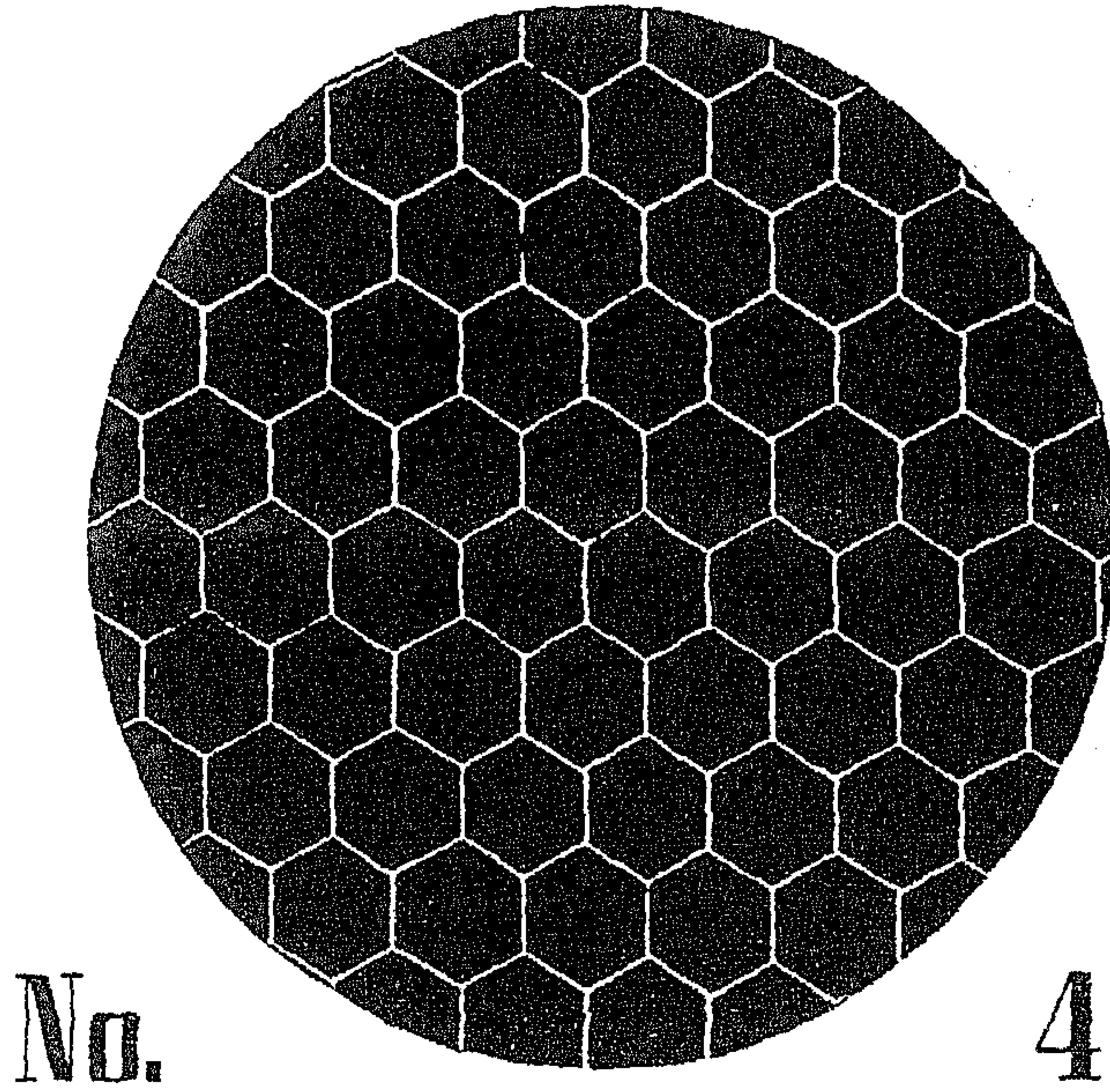



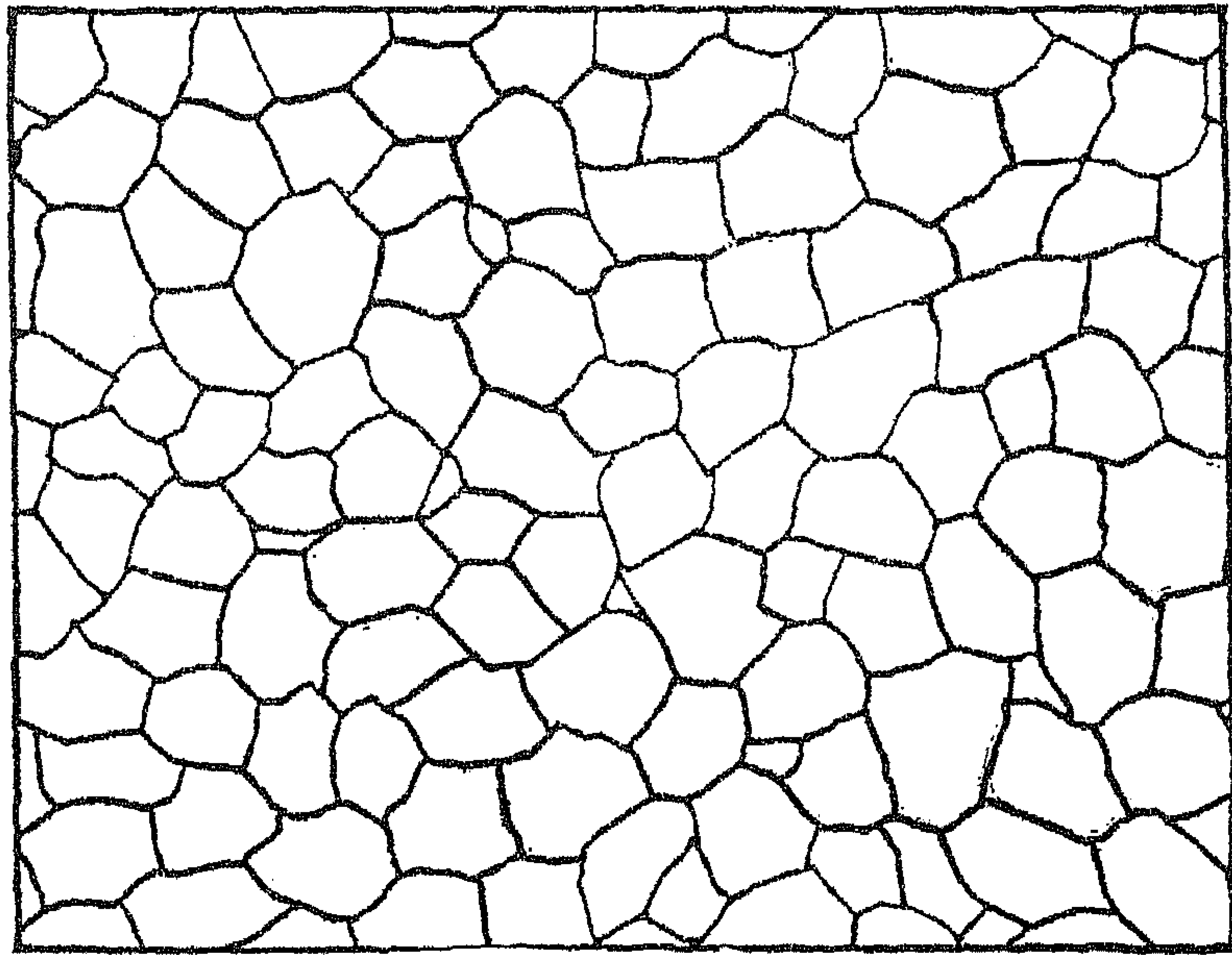
(b) يمثل النموذج الاعلى شبكة سداسية مثالية لمعدل حجم حبيبي رقم (2) في تدرج ASTM ويمثل حبيبتين بالانج المربع الواحد. اما النموذج الأسفل فيمثل حجم حبيبي قياسي برقم (2) في تدرج ASTM وعدد الحبيبات في الانج المربع يتراوح بين 1 الى 3 عند التكبير (100X)



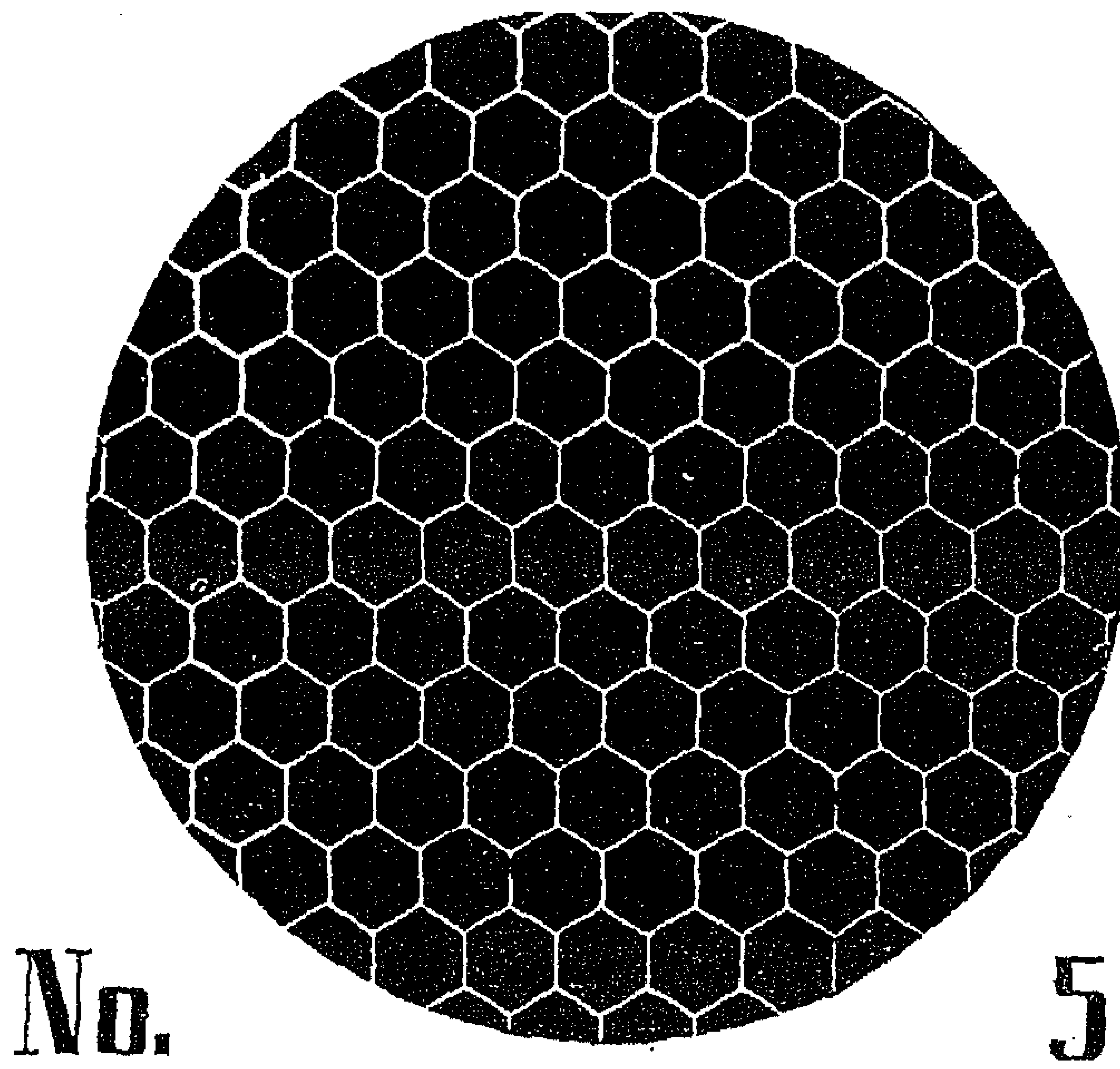



(C) يمثل النموذج الاعلى شبكة سداسية مثاليه لمعدل حجم حبيبي رقم (3) في تدرج ASTM ويمثل اربع حبيبات بالانج المربع الواحد. اما النموذج الأسفل فيمثل حجم حبيبي قياسي برقم (3) في تدرج ASTM ويتراوح عدد الحبيبات في الانج المربع يتراوح بين 3 الى 6 عند التكبير (100X)

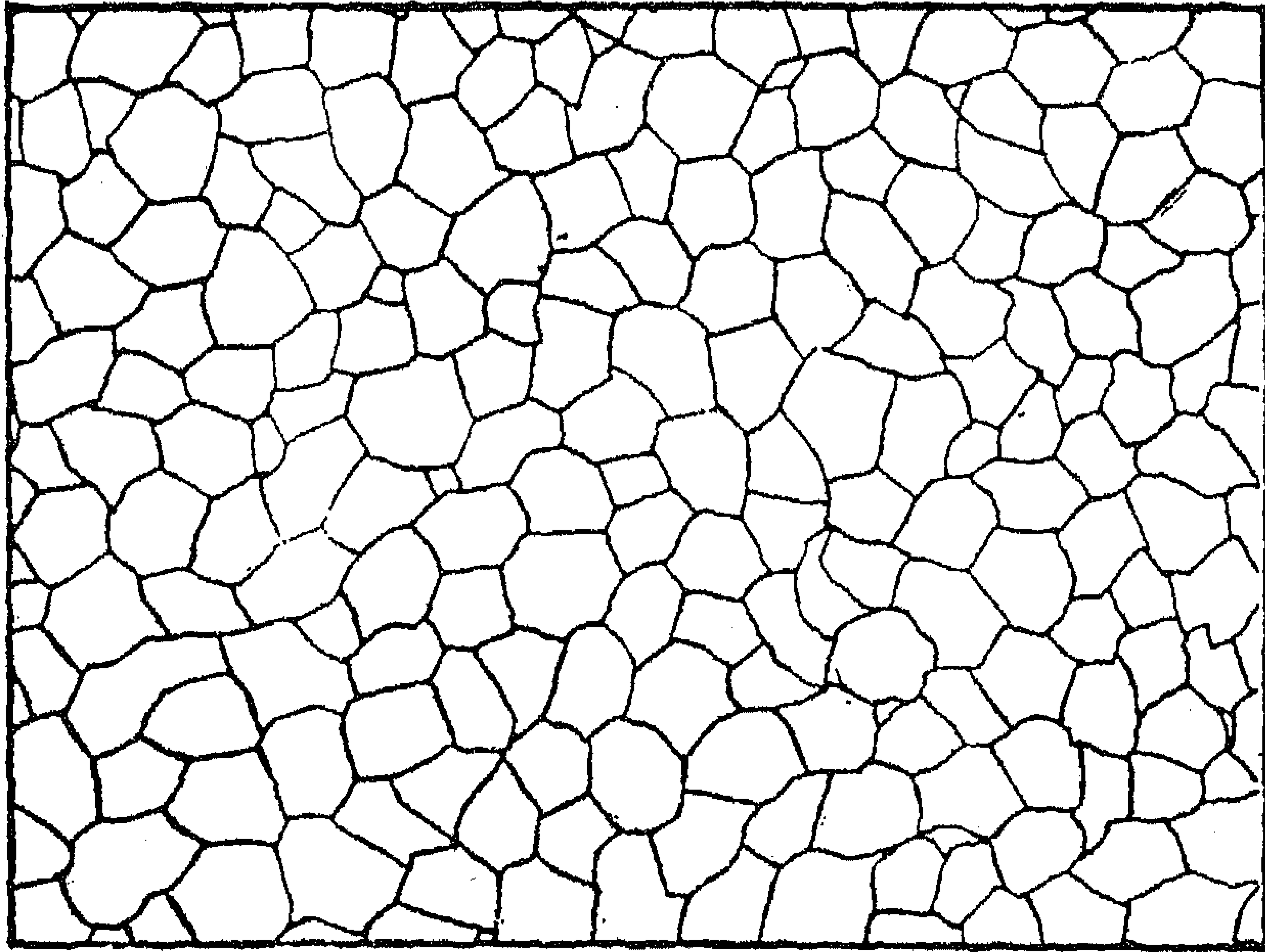


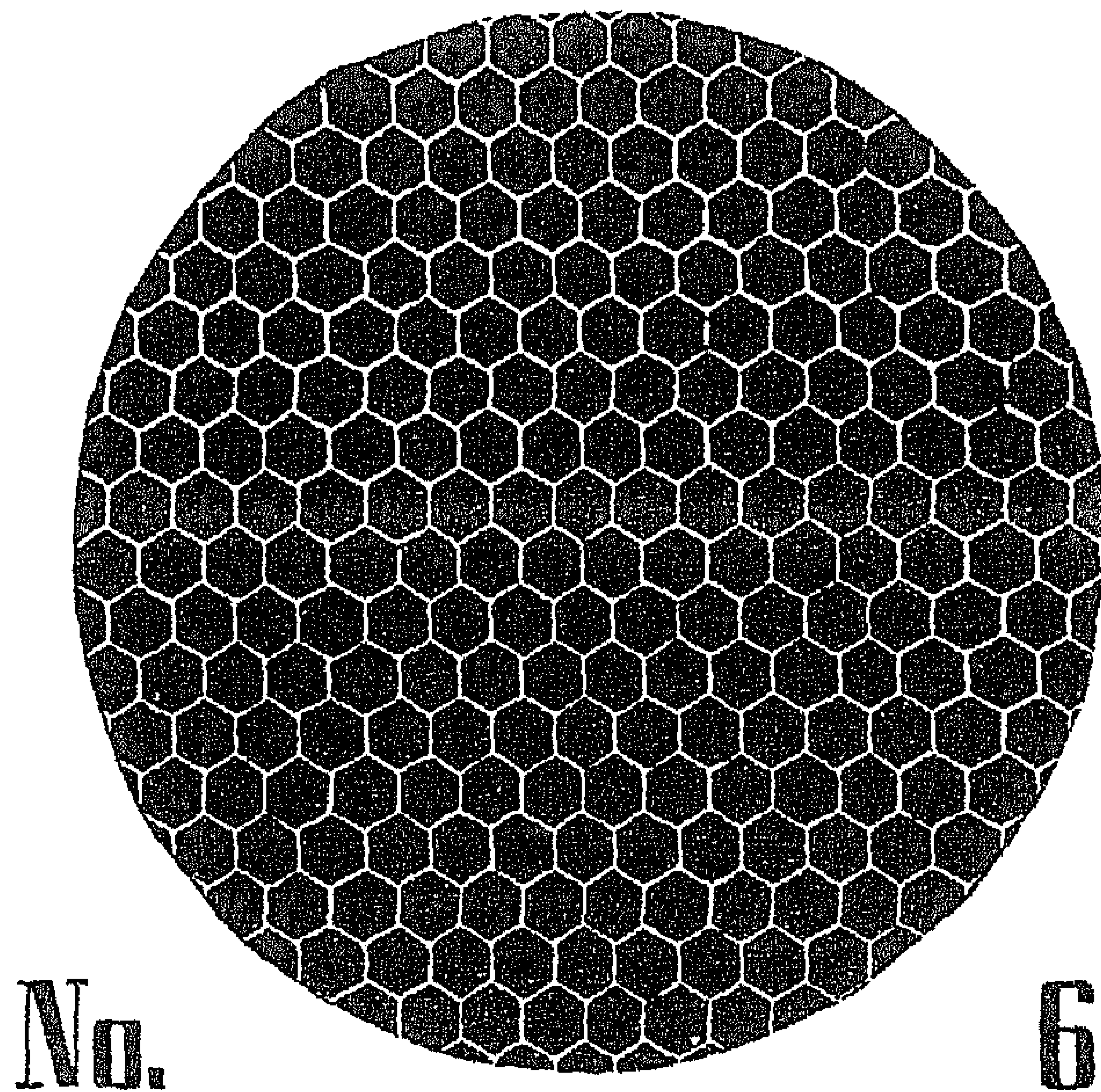
(d) يمثل النموذج الاعلى شبكة سداسية مثالية لمعدل حجم حبيبي رقم (4) في تدرج ASTM ويمثل ثمان حبيبات بالانج المربع الواحد. اما النموذج الأسفل فيمثل حجم حبيبي قياسي برقم (4) في تدرجASTM وعدد الحبيبات يتراوح بين (6) الى (12) عند التكبير (100X)

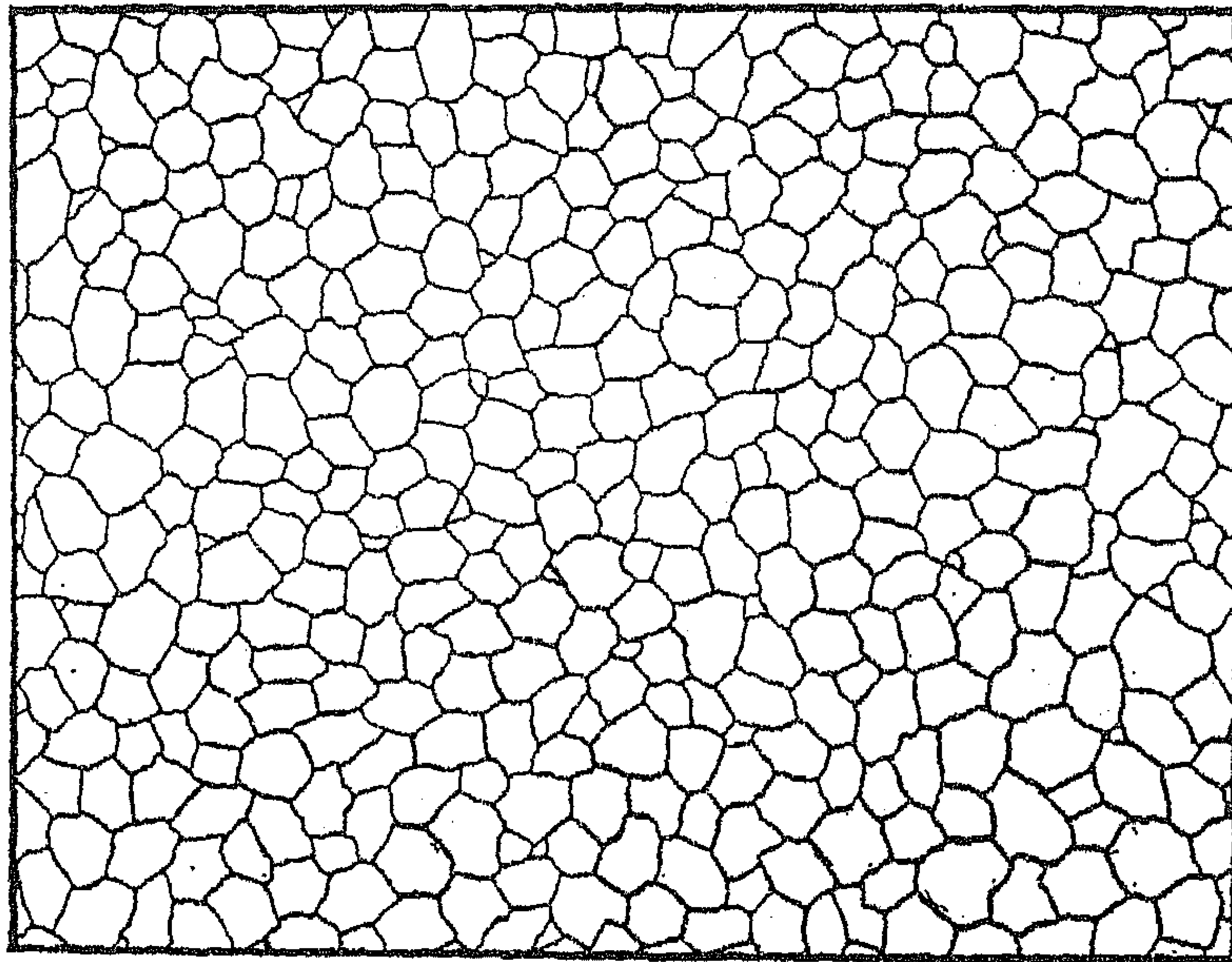


No. 5

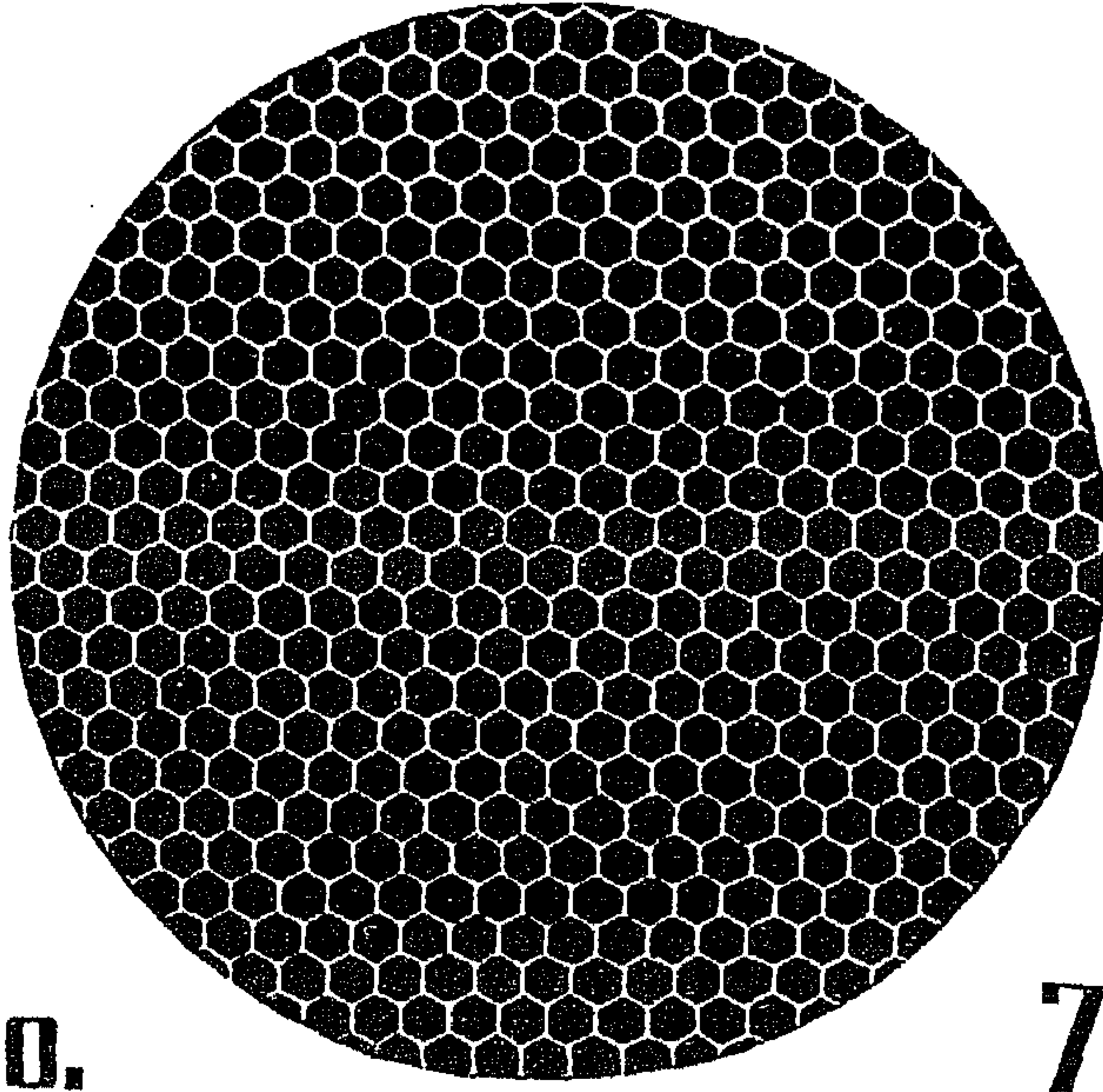


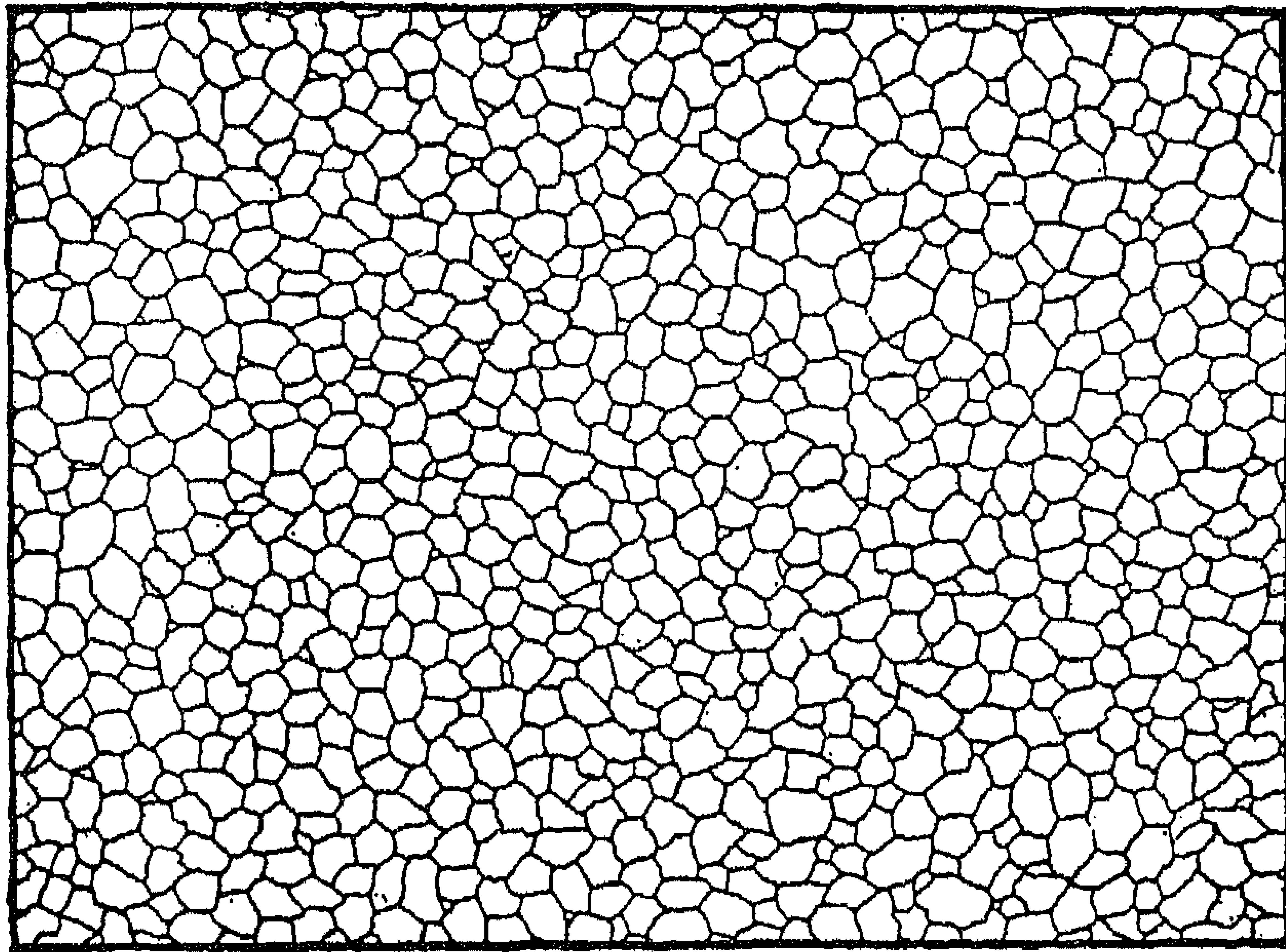
(e) يمثل النموذج الاعلى شبكة سداسية مثالية لمعدل حجم حبيبي رقم (5) في تدرج ASTM ويمثل 16 حبيبه بالانج المربع الواحد. اما النموذج الأسفل فيمثل حجم حبيبي قياسي برقم (5) في تدرجASTM وعدد الحبيبات في الانج المربع يتراوح بين 12 الى 24 عند التكبير (100X)



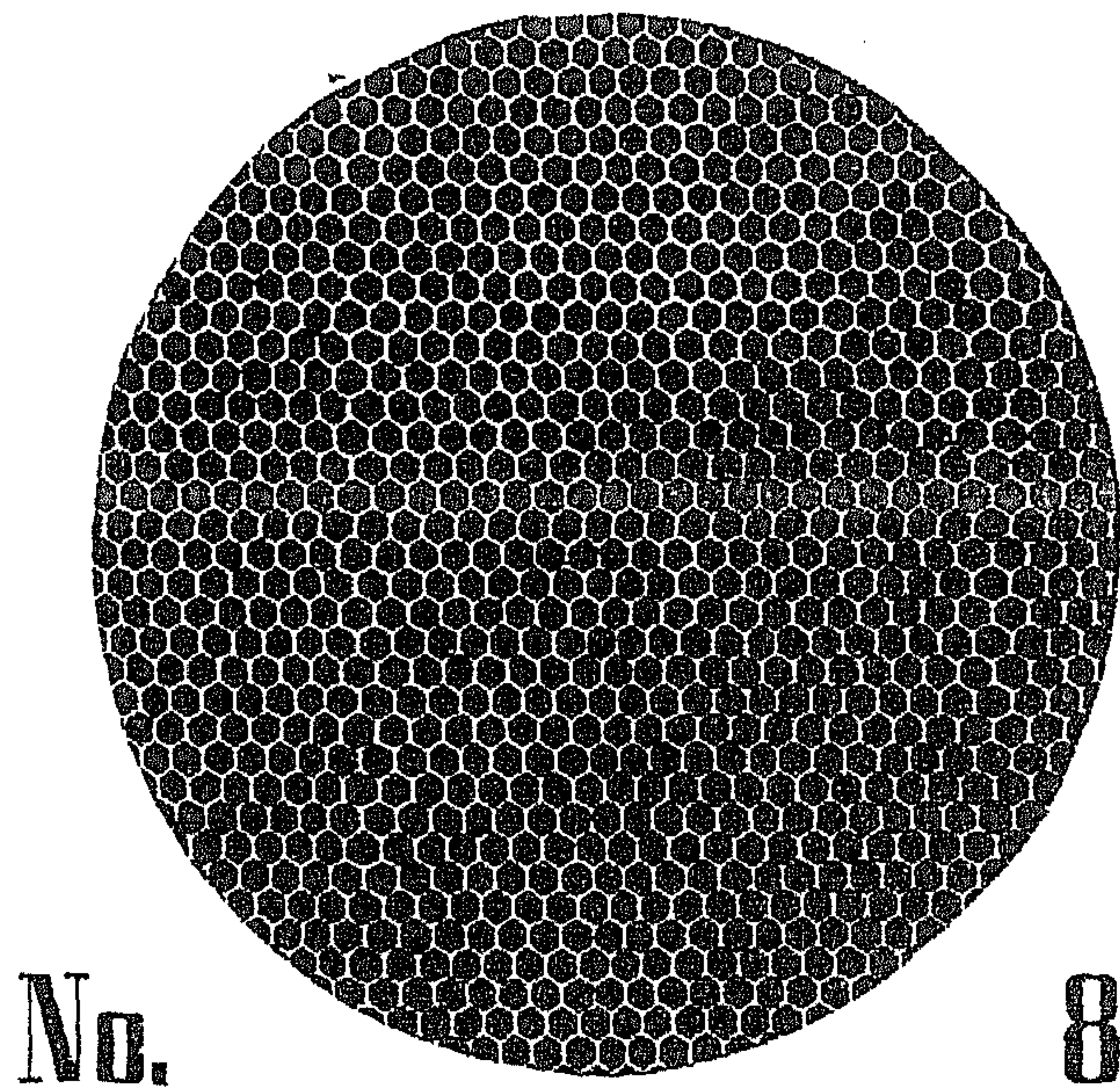



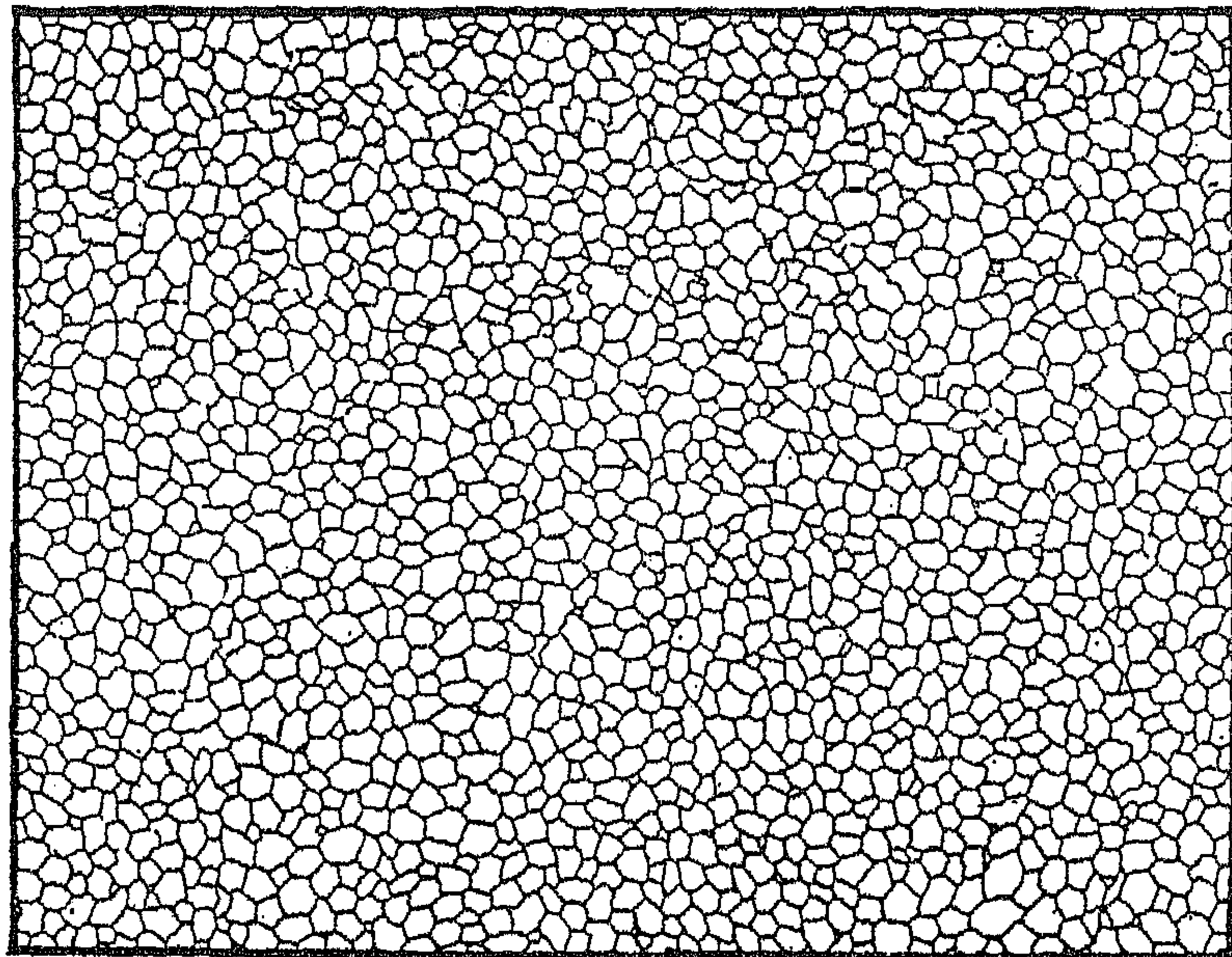
(f) يمثل النموذج الاعلى شبكة سداسية مثالية لمعدل حجم حبيبي رقم (6) في تدرج ASTM ويمثل 32 حبيبة بالانج المربع الواحد. اما النموذج الأسفل فيمثل حجم حبيبي قياسي برقم (6) في تدرجASTM وعدد الحبيبات في الانج المربع يتراوح بين 24 الى 48 عند التكبير (100X)



(g) يمثل النموذج الاعلى شبكة سداسية مثالية لمعدل حجم حبيبي رقم (7) في تدرج ASTM ويمثل 64 حبيبة بالانج المربع الواحد. اما النموذج الأسفل فيمثل حجم حبيبي قياسي برقم (7) في تدرجASTM وعدد الحبيبات في الانج المربع يتراوح بين 48 الى 96 عند التكبير (100X)



(h) يمثل النموذج الاعلى شبكة سداسية مثالية لمعدل حجم حبيبي رقم (8) في تدرج ASTM ويمثل 128 حبيبة بالانج المربع الواحد. اما النموذج الأسفل فيمثل حجم حبيبي قياسي برقم (8) في تدرجASTM وعدد الحبيبات في الانج المربع يتراوح بين 96 الى 192 عند التكبير (100X)

أما مجموع عدد هذه الشبكات فهو 14 (الجدول 8-1) بموجب المواصفة ASTM E112 كل منها يمثل حجم من الحجوم الحبيبية . ولقياس الحجم الحبيبي يتم اختيار الشبكة الأكثر تطابقاً مع بنية النموذج المطلوب قياس حجمه الحبيبي بتغيير هذه الشبكات (المرسومة على اوراق شفافة عادة) حتى يتطابق مقاس فتحاتها (عيونها) مع المقاس او الحجم الحبيبي للنموذج المفحوص بعدما يتم تحضيره باتباع الاسلوب القياسي للتحضير ومن ثم يتم استخراج رقم تدرج الحجم الحبيبي من رقم الشبكة لأن كل شبكة تمثل حجم حبيبي معين.

وكالآتي:

$$n=2^{g-1} \qquad \text{.............. (5-8)}$$

حيث تمثل n معدل عدد الحبيبات (البلورات) بالإنج المربع الواحد عند التكبير مئة ضعف.

g هو رقم دليل الحجم الحبيبي (grain size index unmber) في شبكة قياس ASTM وهو الرقم المثبت على كل شبكة من الشبكات الثمانية اي انه من الرقم 1 حتى الرقم 8 .

وعليه إذا كان g =3 ، على سبيل المثال، فإن عدد الحبيبات في الانج المربع (n) سيكون.

$$n= 2^{3-1} = 4$$

ويمكن كتابة العلاقة اعلاه بموجب المواصفة ASTM E91 كالآتي:

$$N_A=15.5x2^{g-1} \qquad \text{.............. (6-8)}$$

حيث تمثل $N_A$ عدد الحبيبات في المليمتر المربع الواحد لسطح النموذج و g رقم دليل الحجم الحبيبي في الشبكة القياسية ASTMعند تكبير مقداره مئة ضعف ايضاً. وعند كون $N_A$ هي المعلومة يمكن استخدام العلاقة (8-6) لحساب (g) وكالآتي:.

$$g= -2.954 + 3.322 \log N_A$$

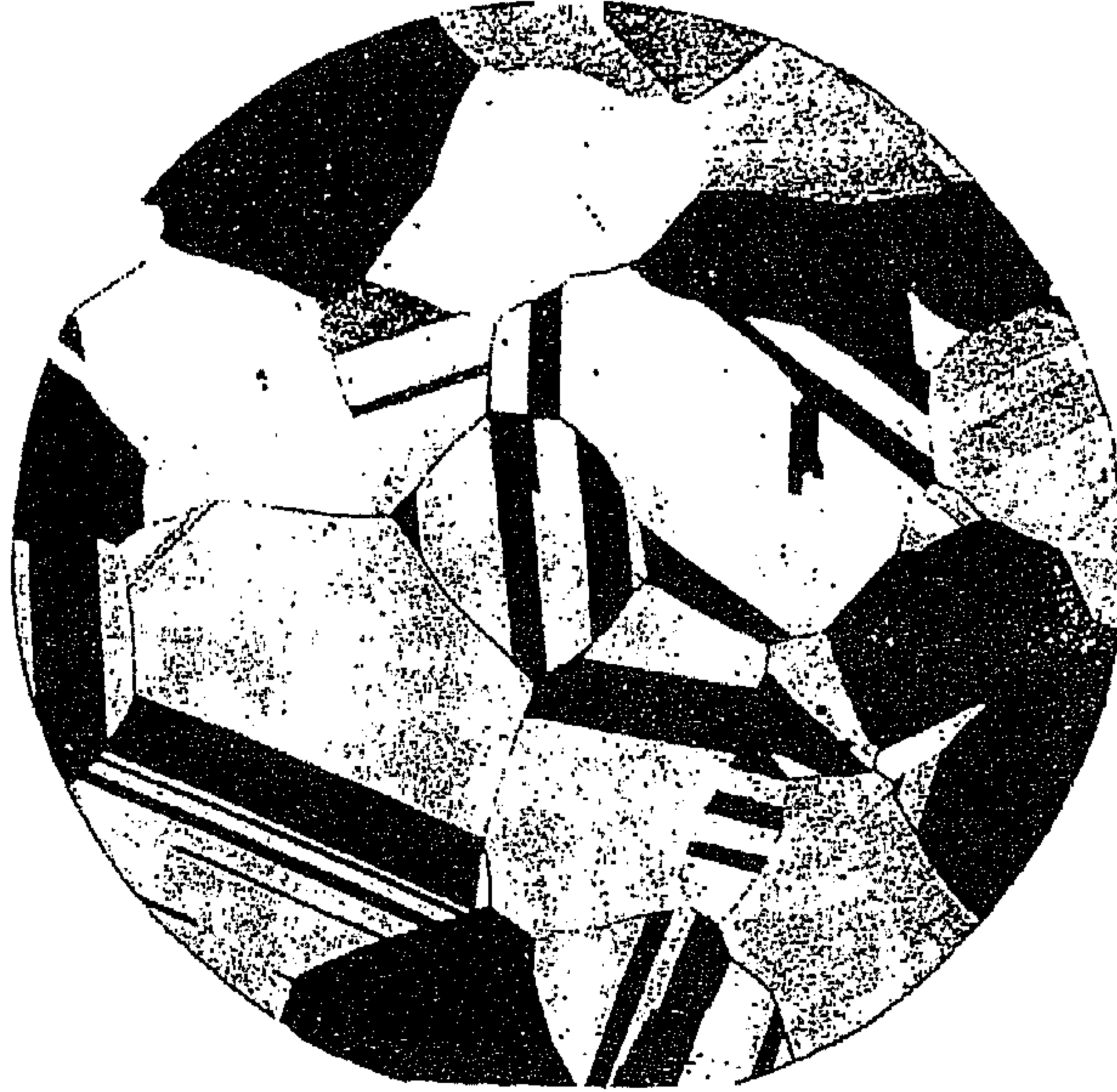
جدول (8-1) يبين 14 رقم حجم حبيبي ASTM .

| قطر الحبيبة التقريبي (µm) | $mm^2$ / حبيبه | رقمASTM |
|---|---|---|
| 500 | 4 | -1 |
| 354 | 8 | 0 |
| 250 | 16 | 1 |
| 177 | 32 | 2 |
| 125 | 64 | 3 |
| 88.4 | 128 | 4 |
| 62.5 | 256 | 5 |
| 44.2 | 512 | 6 |
| 31.2 | 1024 | 7 |
| 22.1 | 2048 | 8 |
| 15.6 | 4096 | 9 |
| 11.0 | 8200 | 10 |
| 7.81 | 16400 | 11 |
| 5.52 | 32800 | 12 |

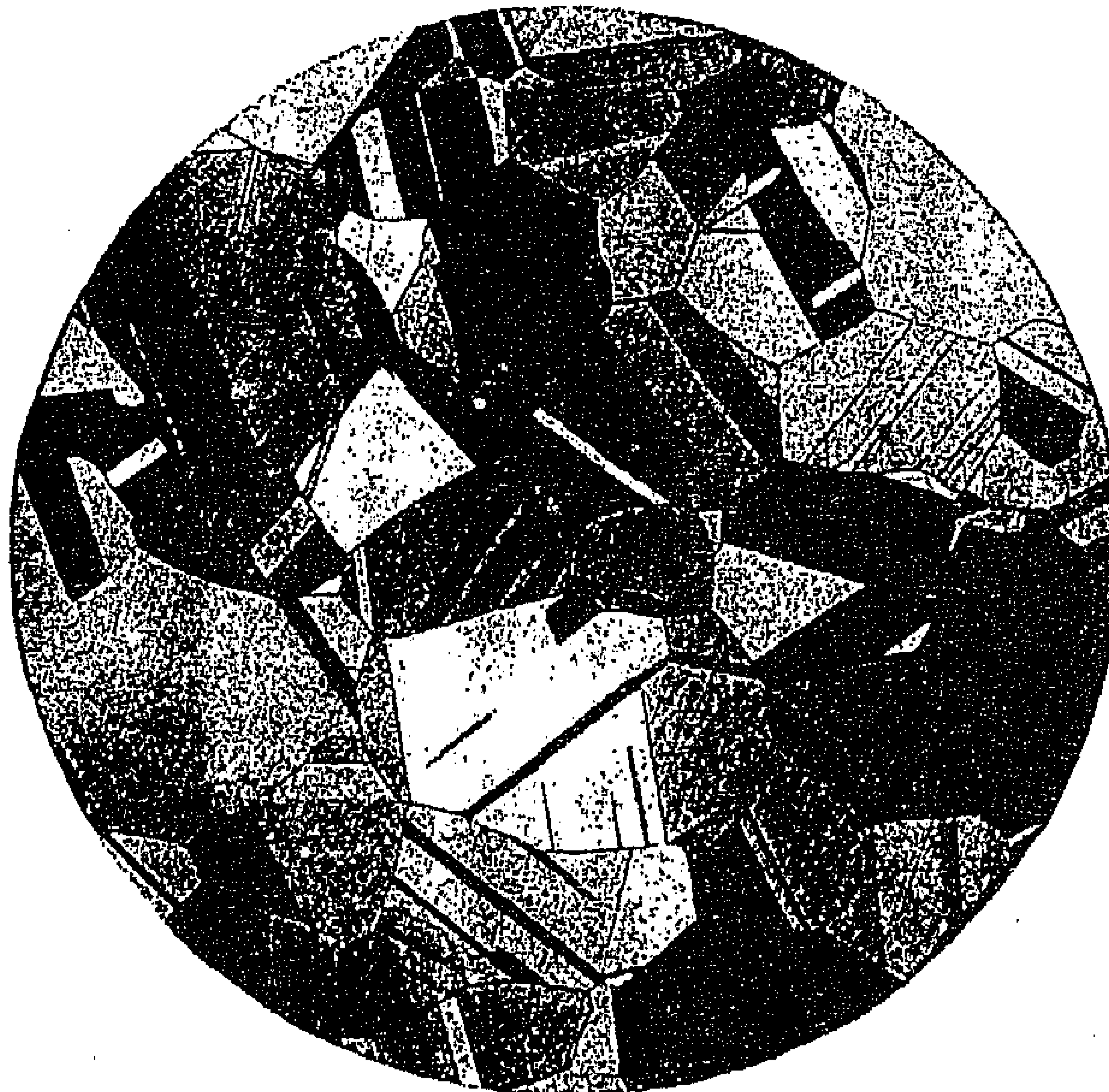
وعادة ما يكتفى بمعرفة رقم دليل الحجم الحبيبي (g) المطابق لبنية النموذج المحدد بدلاً من حساب n أو $N_A$.

هذا ما كان من أسلوب قياس السبائك الحديدية ( ferrou s alloys) .

اما بالنسبة لقياس الحجم الحبيبي للسبائك والمعادن اللاحديدية (nonferrous alloys) فيمكن استخدام نفس اسلوب مقارنه البنية المجهرية للنموذج المراد قياس حجمه البلوري (الحبيبي) مع لوحات ASTM قياسيه أخرى (غير تلك التي استخدمت في قياس الحجم الحبيبي للسبائك الحديدية) وكما في الشكل (8-6) . الخاص بلوحات البراص الفا (α-Brass) وعند تكبير قياسي مقداره 75 ضعفاً (75x). ان عدد هذه اللوحات عشرة مدرجة بدلالة معدل ابعاد الحبيبه (average grain dimensions) الحقيقيه وتتراوح بين 0.20mm وحتى 0.01mm . وطريقة المقارنة (ASTM) آنفة الذكر تصلح للحبيبات (البلورات) متساوية المحاور (equi-axed grains) فقط .

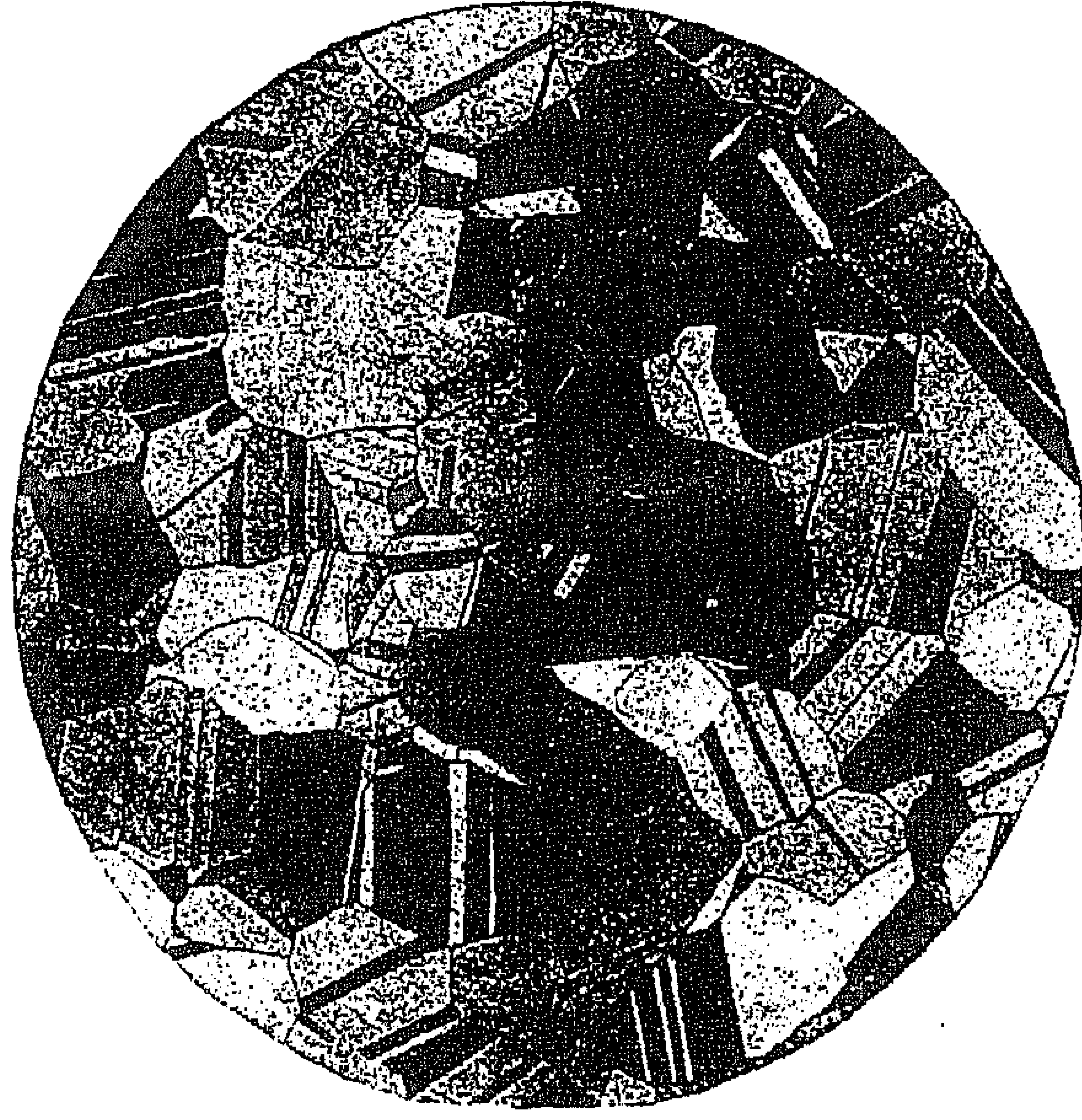


(a) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لا حديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.2mm.

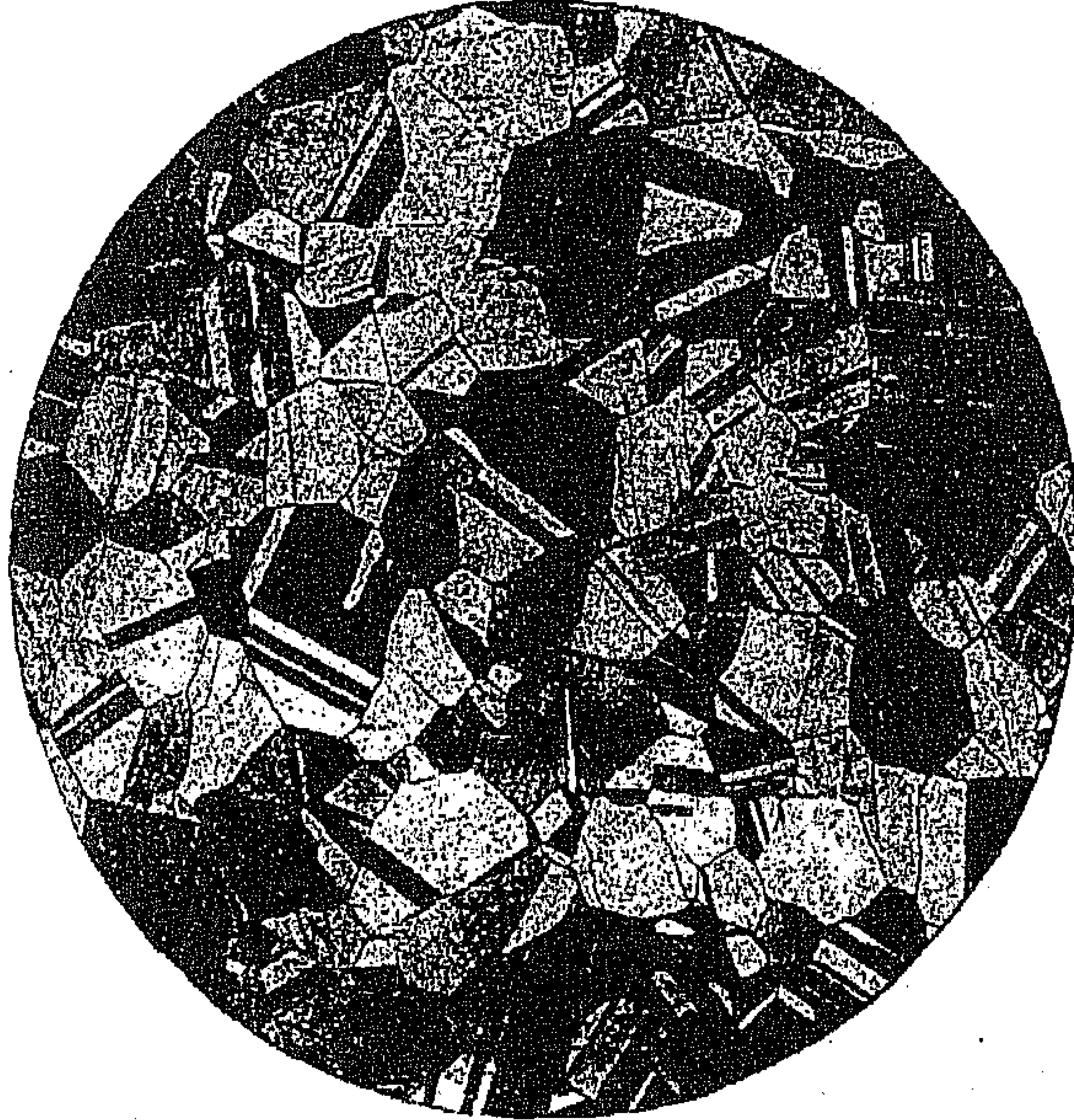


(b) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لاحديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.15mm .

الشكل (8-6) نماذج صور ASTM لحجوم حبيبية مختلفة (j,i,h,g,f,e,d,c,b,a) ولسبيكة لاحديدية (براص- الفا).



(c) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لا حديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.12mm.



(d) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لاحديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.15mm .



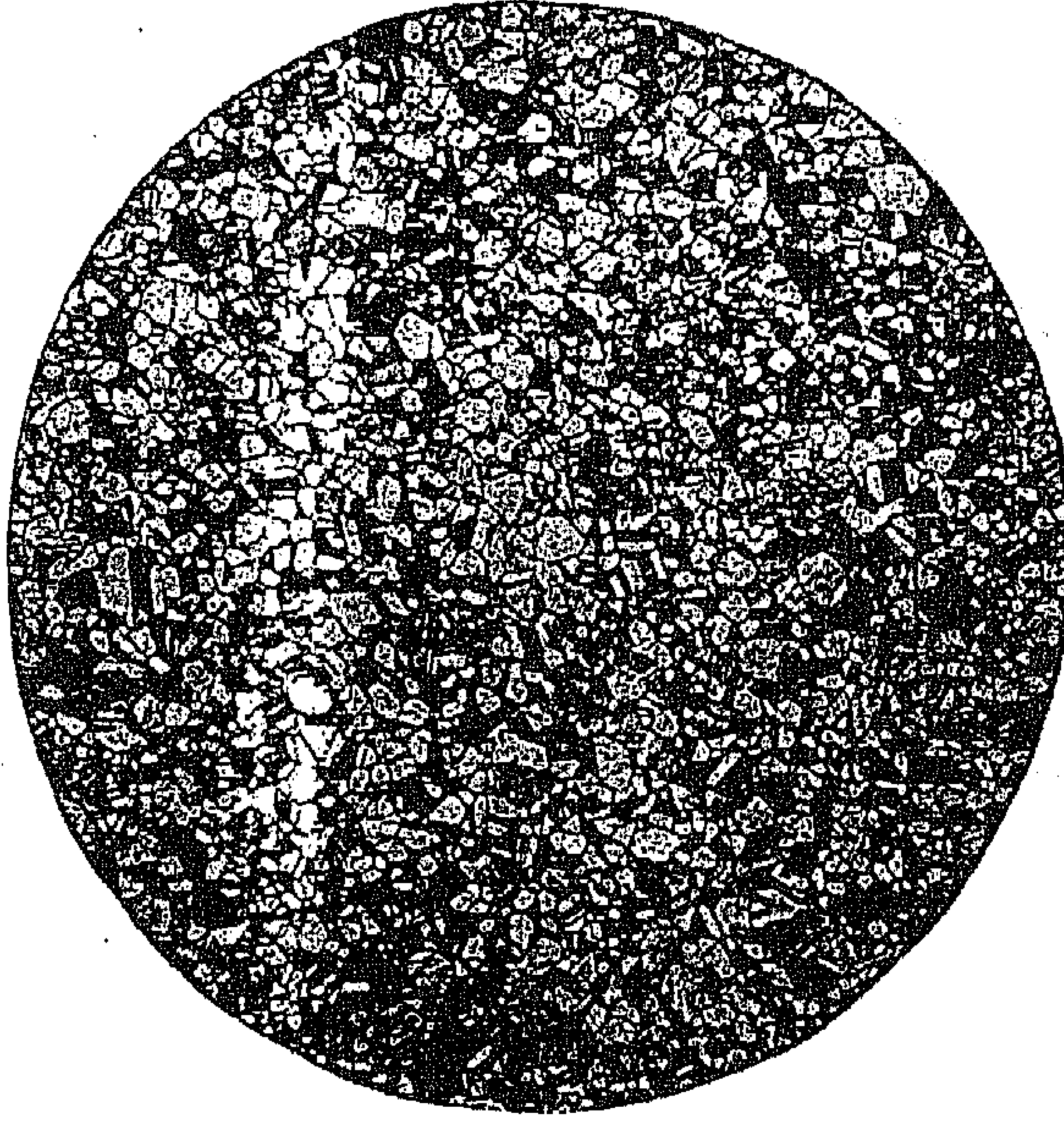
(e) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لا حديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.065mm.



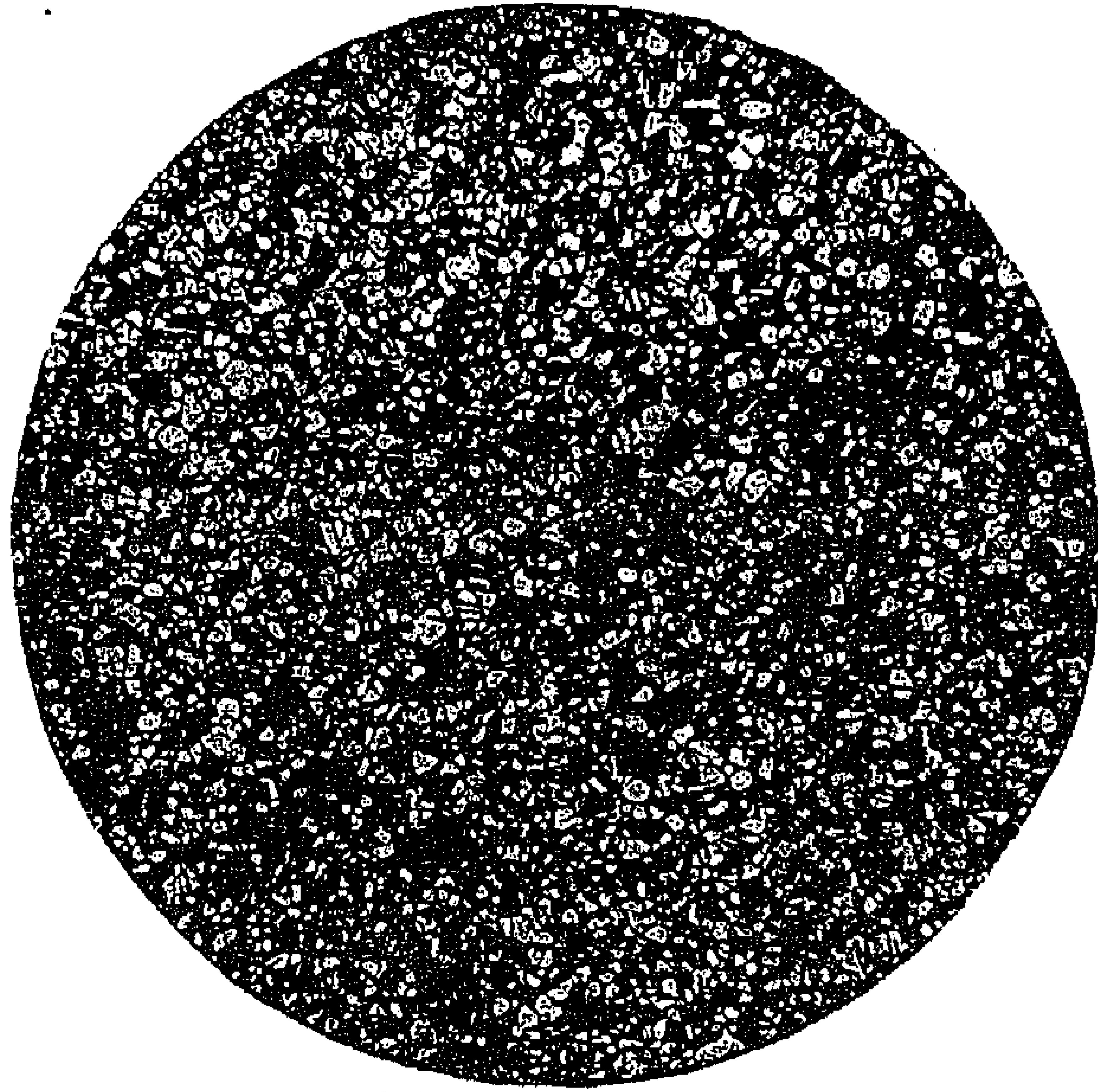
(f) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لاحديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.045mm .



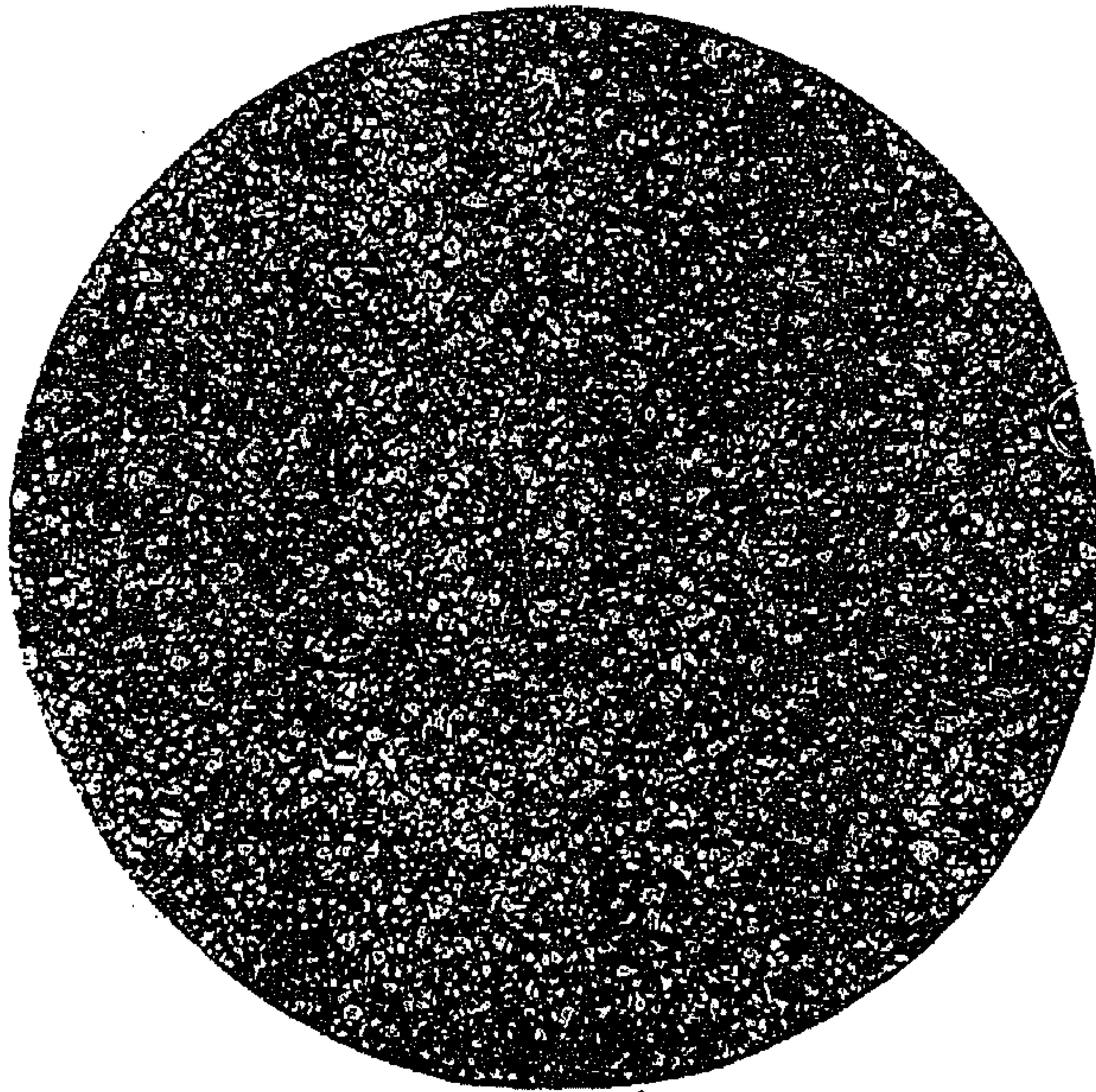
(g) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لا حديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.035mm.



(h) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لاحديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.025mm .



(i) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لا حديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.015mm.



(j) حجم حبيبي قياسي في تدرج لوحات ASTM لسبيكة لاحديدية. يمثل معدل قطر حبيبي 0.01mm .

ان طريقة المقارنة آنفة الذكر هي طريقة سريعة النتائج وكثيرة الاستخدام في الصناعة خاصة وفي القياسات الروتينية عامة، إلا أنها تفتقر الى الدقة ولذلك لا تستخدم في البحوث العلمية او عندما تراد نتائج دقيقة ومطابقة للواقع. وعندئذٍ تستخدم إما طريقة جفريز او طريقة معدل التقاطع الخطي حيث ان الاخيرة اكثر استخداماً لاسباب سوف تذكر فيما بعد.

**٢- الطريقة المساحية (طريقة جفريز): Planimetric Method (Jeffries)**

طوّرت الطريقة المساحية من قبل جفريز، ثم استخدمت لسنوات عديده في قياس عدد الحبيبات في وحدة المساحة لمقطع مستو، حيث يمكن ان تقارن هذه الطريقة مع تدرج عدد الحجم الحبيبي للجمعية الامريكية (ASTM) . وقد استعيض في السنوات الاخيرة عن هذه الطريقة بطريقة معدل التقاطع الخطي التي سيأتي ذكرها وذلك لانها أبسط في الاستخدام وأكثر ملائمة لمختلف البنى المجهرية.

يتم تنفيذ طريقة جفريز ، بشكل عام، برسم دائرة (أو مستطيل) ذات قطر مقداره 79.8mm (مساحتها $5000mm^2$ ) على الصورة المجهرية مباشرة او على ورقة شفافه كما في الشكل (8-7) . يتم تغيير قوة تكبير المجهر بحيث تتضمن مساحة الدائرة مالايقل عن (50) حبيبه. تحسب عدد الحبيبات التي تكون ضمن الدائرة تماماً وليكن ($n_1$) ثم عدد الحبيبات التي تتقاطع مع المحيط وليكن ($n_2$) . فيكون مجموع الحبيبات الواقعة فعلاً ضمن الدائرة هو (N) فيكون:

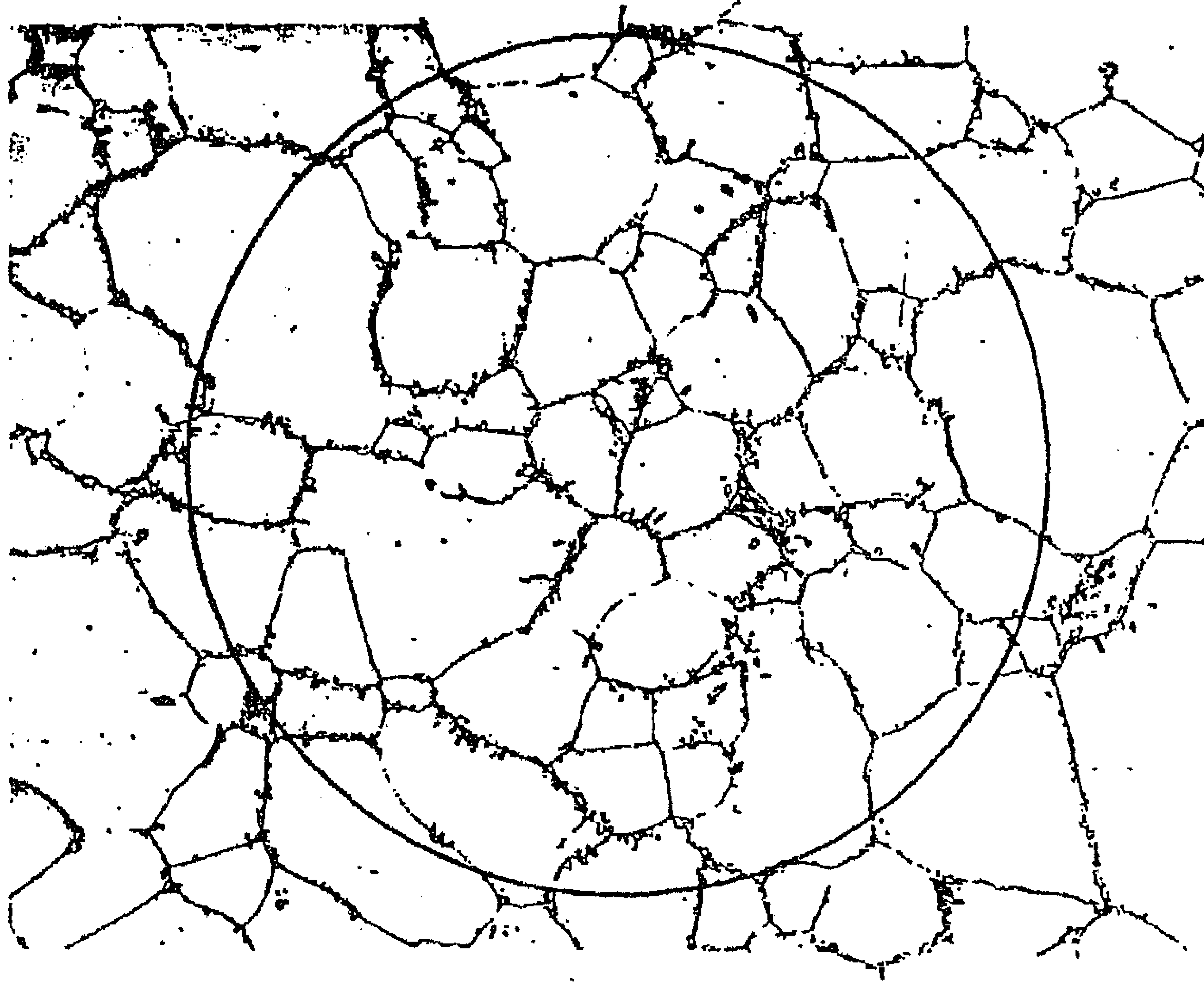
$$N = n_1 + \frac{n_2}{2} \qquad .......... (7\text{-}8)$$

أما عدد الحبيبات في المليميتر المربع الواحد ($N_A$) فيحسب كالآتي:

$$N_A = f\left(n_1 + \frac{n_2}{2}\right) \qquad .........(8\text{-}8)$$

f هو معامل جفريز الخاص بالتكبير المستخدم (M) حيث يكون:

$$f = \frac{M^2}{5000} \qquad ......... (9\text{-}8)$$



**الشكل (8-7) يبين كيفية قياس الحجم الحبيبي بالطريقة المساحية (طريقة جفريز Jeffeies ) .**

ان ا لدائرة المبينه في الشكل لها قطر=79.8mm اي بمساحة $5000mm^2$. ان تكبير الصوره اعلاه 100X . وقد تم حساب عدد الحبيبات ضمن هذه المساحة وقد ظهر ان :

44 حبيبه تقع داخل هذه الدائرة تماماً و

25 حبيبه تتقاطع مع المحيط.

f (معامل جفريز) للتكبير $100X = 2 = \frac{(100)^2}{5000}$

فيكون عدد الحبيبات بالمللي متر المربع الواحد ($N_A$)

$$N_A = 2\left(44 + \frac{25}{2}\right) = 113$$

أما معدل مساحة الحبيبه ($\bar{A}$) فهو

$$\bar{A}\,(mm^2) = \frac{1}{N_A} \qquad ............... (10\text{-}8)$$

وبذلك يكون معدل قطر الحبيبه (d) هو:

$$\bar{d}\,(mm) = \sqrt{(\bar{A})} = \frac{1}{\sqrt{N_A}} \qquad ............ (11\text{-}8)$$

**٣- طريقة معدل التقاطع الخطي Mean linear intercept method :**

تستلزم طريقة هاين التأشير على الصوره المجهرية ا وعلى ورقة شفافة للحصول على العدد المضبوط، ولذا كانت الطريقة بطيئة نسبياً. يمكن الحصول على سرعة عالية في القياسات وبنفس الضبط باستخدام تقنية عد التقاطعات. وحيث ان عنصر الفحص في هذه الطريقة هو خط بدلاً من مساحة فيمكن الحصول على عدٍ دقيق بدون الحاجة الى التأشير على الصوره. وفي الواقع يمكن استخدام شبكة خطوط (أو خط واحد) موضوعه على العدسه العينيه وبذلك يمكن تجنب استخدام الصور وبنفس الدقة في العمل. يمكن تنفيذ طريقة معدل التقاطع الخطي لحساب الحجم الحبيبي بجزء من الوقت اللازم عند استخدام طريقة جفريز. وهذا الوقت اكثر بقليل من الوقت اللازم عند استخدام طريقة المقارنة الامريكية. تعتبر طريقة التقاطع الخطي الطريقة الاكثر ملائمة في قياس الحبيبات غير المتساوية الابعاد. كما ان عدد التقاطعات بوحدة الطول ($N_L$) تتناسب بصوره مباشرة مع المساحة السطحية بوحدة الحجم ($S_v$) للحدود البلورية (الحبيبيه) وكالآتي:

$$S_V = 2N_L \qquad .............(12\text{-}8)$$

يمكن تنفيذ هذه الطريقة باستخدام خط مستقيم او منحنى ذو طول كلي ($L_T$) معلوم بحيث يتم رسمه على الصورة مباشرة، كما في الشكل (8-8). او على ورقة شفافة او يكون موضوعاً على العدسة العينيه، كما مرّ ذكره. يتم اختيار التكبير الملائم بحيث يكون عدد الحدود الحبيبيه المتقاطعة مع خط القياس (N)لايقل عن 50

ولايزيد عن 150 ويمكن حسابها بشكل مضبوط. يعتبر كل حد حبيبي يتقاطع مع خط القياس نقطه واحده اما إذا تقاطعت نقطه ثلاثية للحدود الحبيبيه (نقطة التقاء ثلاث حبيبات) مع الخط فتحتسب $1\frac{1}{2}$ نقطة في حين تعتبر نقطة تماس الحد الحبيبي مع خط القياس ($\frac{1}{2}$) نقطة فقط، وهكذا يمكن حساب مجموع التقاطعات الفعلية (N) .

يحسب مقدار التقاطع بوحدة الطول ($N_L$) كالآتي:

$$N_L = \frac{NM}{L_T} \qquad \text{........... (13-8)}$$

حيث يمثل $L_T$ الطول الكلي للخط المستقيم المستخدم في القياس

M مقدار تكبير الجهاز.

فيكون مقدار الحجم الحبيبي لمعدل التقاطع الخطي هو

$$\bar{L} = \frac{1}{N_L} \qquad \text{............ (14-8)}$$

ولو تم أخذ نموذج متعدد السطوح (Tetrakiadecahedron) ليمثل الحبيبه فعندئذ تكون العلاقة بين الحجم الحقيقي للحبيبة (d) والحجم الحبيبي لمعدل التقاطع الخطي ($\bar{L}$) هي:

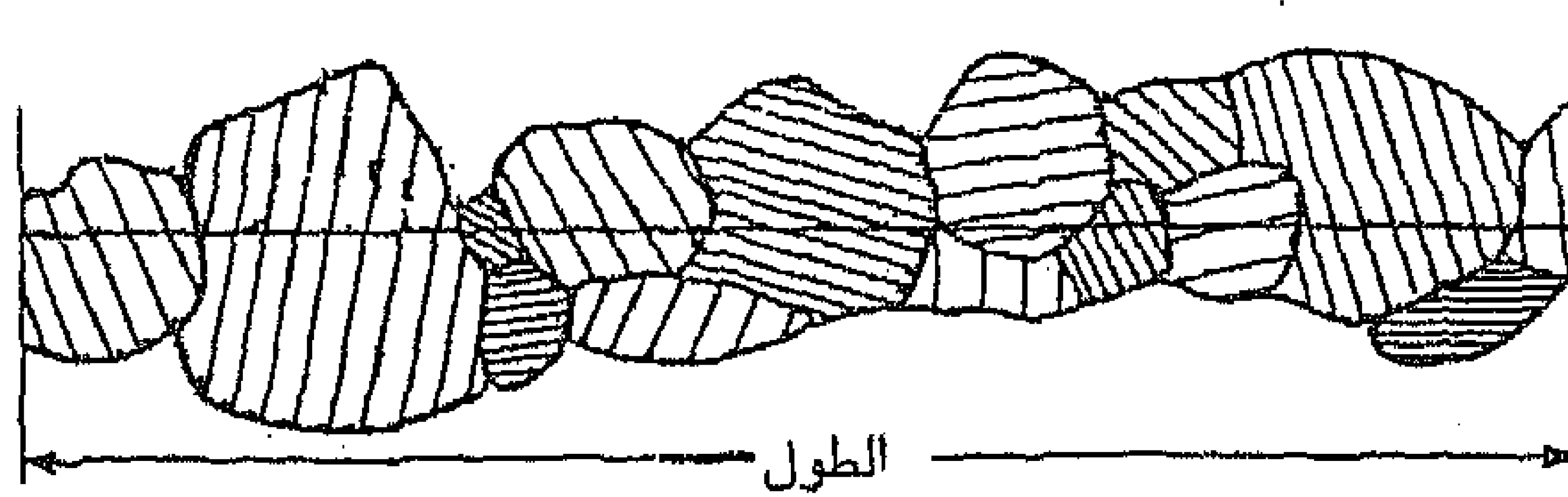
$$d=1.77\,\bar{L} \qquad \text{.............. (15-8)}$$

كما ان هناك علاقة تربط بين ($\bar{L}$) وعدد الحجم الحبيبي بطريقة ASTM (g) وهي:

$$g = [-6.6457 \log\bar{L}] -3.298 \qquad \text{............ (16-8)}$$

ومن ميزات هذه الطريقة انه يمكن معرفة مقدار الاستطالة النسبيه في الحبيبات او مقدار التشكيل الذي اجري على السبيكة، عند استخدام خط مستقيم في القياس. حيث تؤخذ قياسات باتجاه محاور الحبيبات اولاً ثم تؤخذ قياسات اخرى باتجاه عمودي على الإتجاه الاول ولنفس العدد من الحبيبات. ومن نسبة القراءات الثانية الى الأولى يمكن التنبؤ بمقدار التشكيل بفرض ان الحبيبات كانت متساوية المحاور قبل التشكيل.

وإذا اريد التقليل من الخطأ الاحصائي (statistical error) فمن المستحسن اخذ مالايقل عن 500 حبيبه لتعيين الحجم الحبيبي وفي مناطق واتجاهات مختلفة من النموذج ولعدة نماذج لاستخراج المعدل الذي يمثل النموذج المفحوص فعلاً.




**الشكل (8-8) يوضح طريقة معدل التقاطع الخطي لتعيين الحجم الحبيبي.**

في هذا الشكل:

عدد التقاطعات مع الحدود البلوريه 8

عدد نقاط التماس مع الحدود البلورية صفر.

عدد النقاط الثلاثية المار بها الخط 1

اذن مجموع التقاطعات الفعلية = 8 + صفر + $1 \times 1\frac{1}{2}$ =9.5

## ٨-٨ قياس حجم (مقاس) الدقائق: Measurement of particle Size

لقد تم ذكر انه يمكن تعيين الكسر الحجمي (Volume fraction) (Vv) للطور المتشتت (dispersed phase) بطرائق بسيطة هي الخطية (lineal) والمساحية (areal) او التحليل النقطي. ولايعتمد هذا التعيين على اشكال الدقائق التي قد تكون

لها سواء كانت أشكال مثالية ام لا. وهذا غير صحيح بالنسبة لمشكلة تقدير عدد الدقائق بوحدة الحجم وأبعاد الدقائق. ففي كلتا الحالتين يجب معرفة شكل الدقائق. وعلى المستوى العملي يجب ان يتمكن الشخص من ان يقرر ان شكل الطور المنتشر (المتشتت) كروي او قرصي او يأخذ شكل القضبان (rods) اواي شكل هندسي مثالي. لقد تم اشتقاق العلاقات الخاصة بكثافة الدقائق وابعادها باستخدام معلمات (Parameters) مقاسه على مقاطع مصقوله (Polished). وكل علاقه تتعلق بشكل هندسي معين وعلى فرض ان حجمها ذو توزيع منتظم . أما بالنسبة الى حالات التوزيع غير المنتظم للحجم فيجب ان تؤخذ بصوره منفصلة.

**حجم وتوزيع الدقائق الكروية Size and Distribution of Spherical Particles**

يمكن تعيين عدد من الماهيات من قياسين هما $N_L$ و $N_A$ حيث يمكن أخذهما من المقاطع المستوية وحسب الباحث فُلمان (Fullman) فإذا كان :

$N_A$ = عدد الدقائق بوحدة المساحة

$N_L$ = عدد الدقائق في وحدة طول الخط.

r = معدل نصف قطر الدقائق الكروية.

فتكون العلاقة

$$r = \frac{2}{\pi} \frac{N_L}{N_A} \qquad ...........(17\text{-}8)$$

ويكون عدد الدقائق الكروية بوحدة الحجم $N_V$ هو

$$N_V = \frac{\pi}{4} \frac{N_A^2}{N_L} \qquad ..............(18\text{-}8)$$

وبالإضافة الى التحليل الخطي والمساحي والنقطي فإن الكسر الحجمي للدقائق الكروية المنتشرة يمكن ان يحسب كالآتي:

$$Vv = \frac{8}{3\pi} \frac{{N_L}^2}{N_A} \qquad ....................(19\text{-}8)$$

## حجم وتوزيع الرقيقة الخفيفة ذات الشكل القرصي:

## Size and distribution of thin circular plate- shaped particles

اعطى فلمان (Fullman) الصيغ الرياضية الآتية التي تنطبق على الدقائق ذات الشكل القرصي المثالي:

$$r = \frac{N_L}{N_A} \quad \text{..............(20-8)}$$

$$t = \frac{Vv}{2N_L} \quad \text{..............(21-8)}$$

$$N_A = \frac{2}{\pi} \frac{N_A^2}{N_L} \quad \text{..............(22-8)}$$

حيث ان r = نصف قطر القرص و t = سمكه على ان يكون r >> t.

## حجم وتوزيع الدقائق الطويلة التي هي بشكل قضبان نحيفة:

## Size and distribution of long, thin rod - shaped particles

اعطى فلمان (Fullman) الصيغ الآتية للقضبان النحيفة والطويلة

$$r = \frac{1}{\pi} \frac{N_L}{N_A} \quad \text{..............(23-8)}$$

$$Vv = \frac{2}{\pi} \frac{N_L^2}{N_A} \quad \text{............(24-8)}$$

حيث r = نصف قطر القضيب و L يمثل طوله وأن : L >> r .

يلاحظ في هذه الحالة ان طول القضبان لايمكن ان يحسب او يقدّر من قياسات المقاطع السطحية.

## حجم وتوزيع الدقائق الاهليلجية :

## Size and distribution of ellipsoidal particles

هناك نوعان من الأجسام الاهليجية وهما شبه الكره المتطاول (prolate el- lipsoid) والذي يتشكل من دوران الجسم الإهليلجي حول قطره الاكبر (a) وشبه الكرة المفلطح (oblate ellipsoid) والذي يتشكل من دوران الجسم الاهليجي حول قطره الأصغر (b) . ومن الضروري تعريف المعلمات الخاصة بالجسم الاهليجي.

g هي النسبة المحورية $\frac{b}{a}$ للجسم الاهليجي الهندسي المتولد.

$k_p(g)$ و $k_o(g)$ هما حدان مجردان واللذان يعتمدان على (g).

$\overline{F}_p$ و $\overline{F}_o$ هما معدلا قيم النسبه بين المحور الاكبر الى المحور الاصغر للأشكال الاهليجية المتكونة من المقاطع المستوية العشوائية لكلا نوعي الاجسام الاهليلجيةالمنتشرة في البنيه التي يمكن الحصول عليها من معدل عدد كبير من القياسات التي تجرى على البنيه. ان كلاً من $\overline{F}_p$ و $\overline{F}_o$ تعتمد على g اوهي دالة لها.

$\overline{Z}_p$ و $\overline{Z}_o$ يمثلان معدل القيم لمقلوبات المحاور الصغرى للمقاطع الاهليجية. يمكن أيضاً استخراج هذه القيم من اجراء القياس على عدد كبير من الدقائق الاهليجية الموجودة في البنيه.

وباستخدام المعلمات آنفة الذكر فقد تم تعريف عدد الدقائق بوحدة الحجم ومعدل ابعاد المحاور الكبرى والصغرى (major and minor axes) للدقائق الاهليجية الشكل:

$$N_v = \frac{2N_A \overline{Z}_p}{\pi k_p(g)} \text{ or } \frac{2N_A \overline{Z}_o}{\pi g k_o^2(g)} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (25\text{-}8)$$

$$\overline{b} = \frac{\pi}{2\overline{Z}_p} \text{ or } \frac{\pi g^2 . k_o(g)}{2\overline{Z}_o} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (26\text{-}8)$$

$$\overline{a} = \frac{\pi}{2 g . \overline{Z}_p} \text{ or } \frac{\pi g . k_o(g)}{2\overline{Z}_o} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (27\text{-}8)$$

**أشكال الدقائق غير المنتظمة Irregular particle shapes :**

تشكل الدقائق غير المنتظمة ذات الحجوم المختلفة ، مشكله حقيقية فقد تم اقتراح بعض الطرائق للتعامل مع مثل هذه الحالات لكنها اما ان تكون صعبة جداً اوغير دقيقة نهائياً وفي الغالب كلا الحالتين معاً.

**معدل المسار الحر بين الدقائق Mean Free Path between Particles :**

يعرّف معدل المسار الحر ($\lambda$) بأنه معدل المسافة بين السطوح الخارجيه للدقائق الموجوده او المنتشرة في البنيه، وهي تعطى بالمعادلة الآتية :

$$\lambda = \frac{1 - V_v}{N_L} \qquad \text{.................. (28-8)}$$

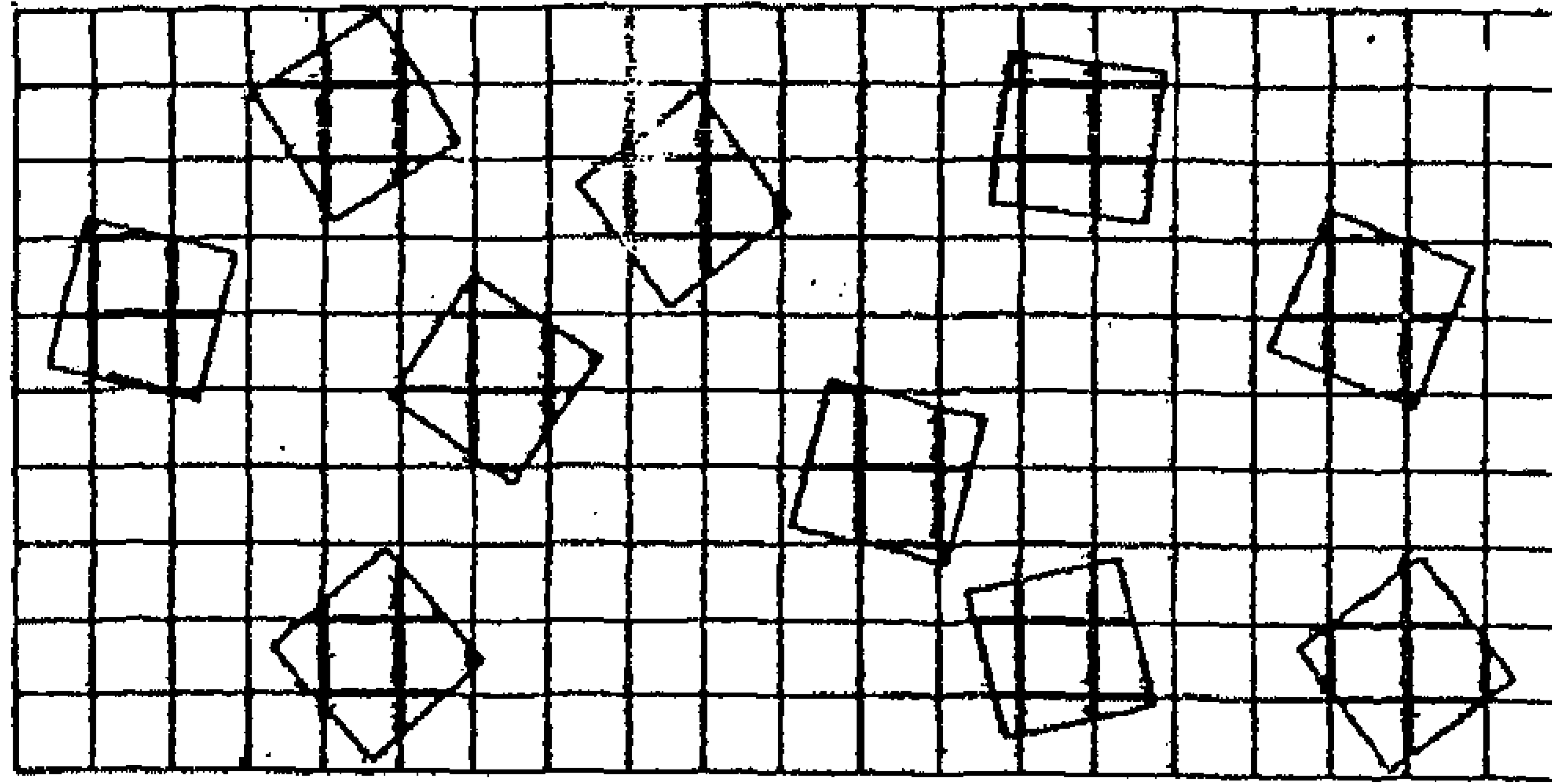
يمكن تطبيق هذه المعادلة لأي توزيع وحجم وشكل للدقائق.

# تمارين الفصل الثامن

١- اشرح باختصار معنى الميتالوغرافيا الكمية (Quantitative Metal-lography) وما الغاية المتوخاة منها .

٢- عرّف مايأتي : الكسر الحجمي والكسر المساحي والكسر الخطي والكسر النقطي ثم اذكر اي التقنيات أكثر استخداماً عند قياس الكسر الحجمي.

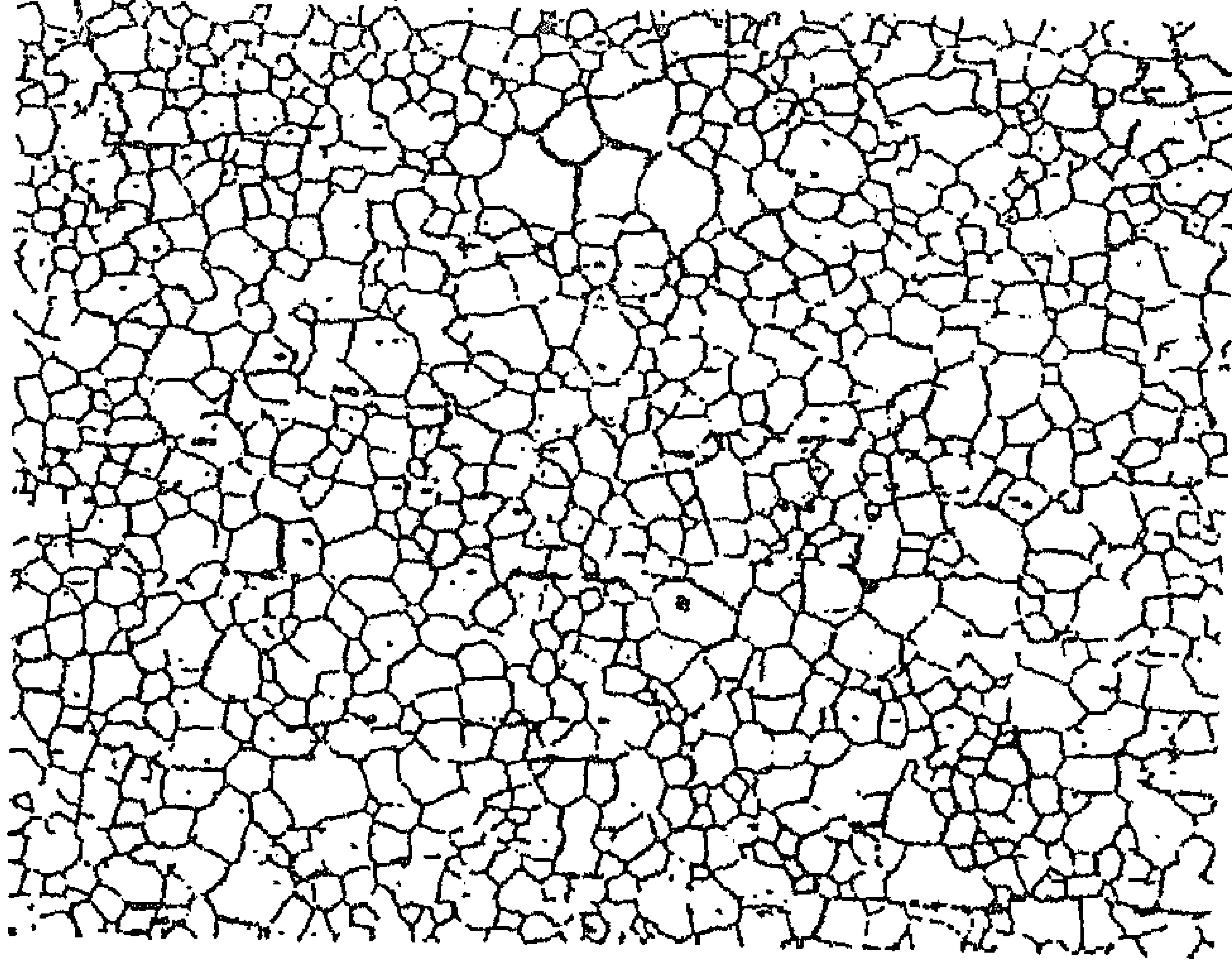
٣- احسب الكسر الحجمي للمربعات المنفصلة العشوائية الترتيب (باعتبارها طور ثاني) والمبينه في الشكل المجاور بالتقنيات الثلاث الكسر المساحي والكسر الخطي والكسر النقطي، ماذا تستنتج من ذلك ؟



٤- عدد طرائق قياس الحجم الحبيبي، واذكر ايهما أفضل ولماذا.

٥- قس الحجم الحبيبي في بنية نموذج مبينه في الشكل ادناه، باحدى طرائق القياس المعروفة، ثم احسب الحجم الحبيبي الحقيقي.

٦- ماهي أهم النقاط التي يجب ان تُراعى عند دراسة بعض الماهيات في البنية الدقيقة للعينة . وكيف يمكن التقليل من الحيود او الخطأ فيها.



**مقدار التكبير 150 x**

# الفصل التاسع

# المقاومة الكهربائية وبعض تطبيقاتها في الفحص

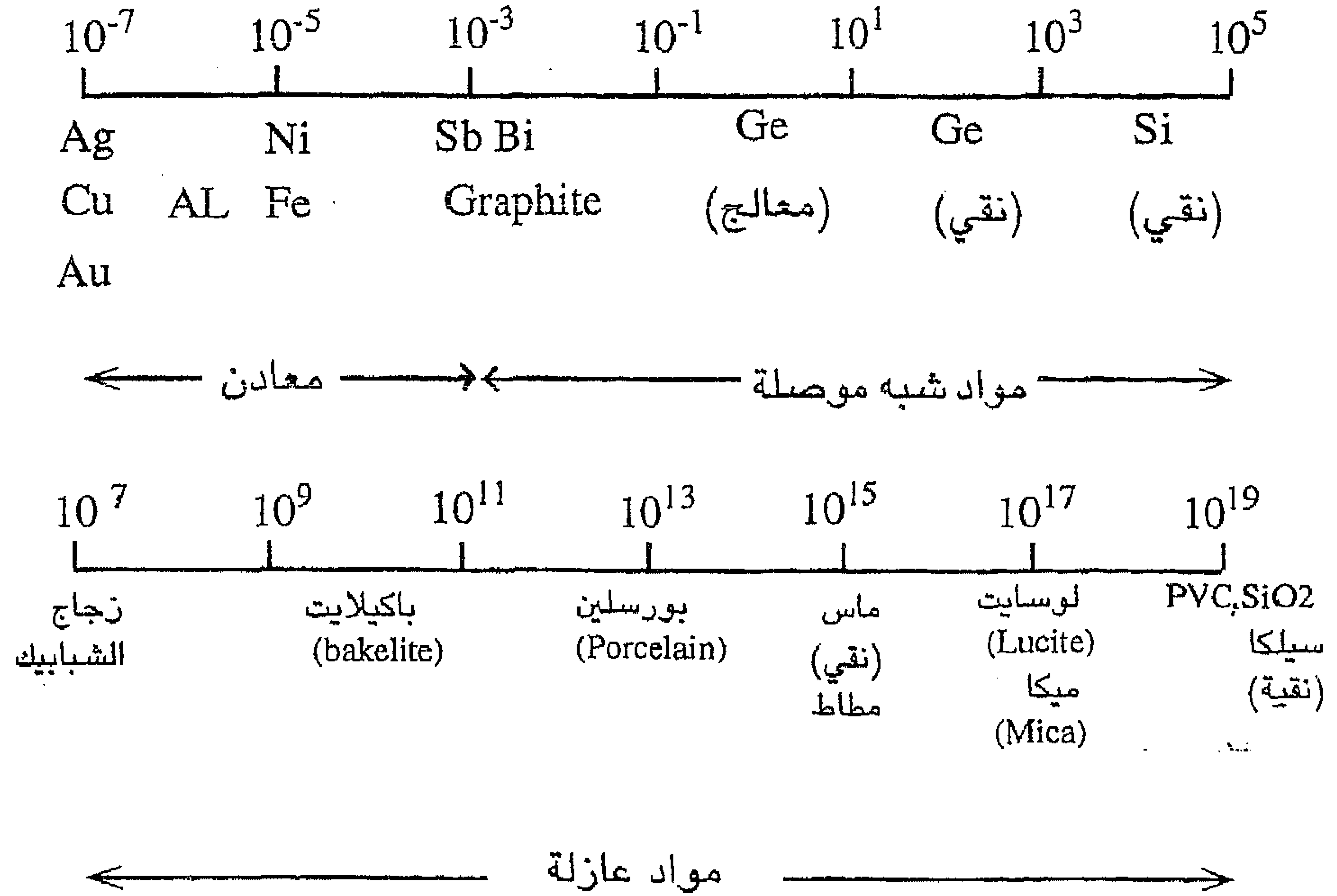
## ١-٩ المقدمة:

تحدد الالكترونات في المدارات الخارجية للذرات السلوك الكهربائي والمغناطيسي والحراري والضوئي للمواد الصلبة . وسيتم تقديم نموذج الالكترون الحر في هذا الفصل بعد تقديم وصف مختصر للمدى الكامل لمقاومية (resistivity) المواد. ومن ثم تناقش المواد الموصلة للتيار الكهربائي والمقاوِمة له وأخيراً أشباه الموصلات.

## ٢-٩ مدى المقاومية:

لعل المقاومية الكهربائية للمواد الصلبة من أكثر الخواص الفيزياوية جداره بالملاحظة لانها تتغير بمدى يربو على 25 مرتبه. ولتصور هذا المدى الواسع يمكن ملاحظة الجدول (9-1),الذي يتضمن مدى المقاومية الكهربائية لعدد من المواد الهندسية المهمة عند درجة حرارة الغرفة. ويمكن تقسيم هذا المدى الى ثلاثة اصناف. فالمواد الموصلة هي المعادن و السبائك ويعتبر الذهب والفضة والنحاس من أفضل الموصلات الكهربائية يليها في ذلك الالمنيوم. أما المعادن الانتقالية كالحديد والنيكل فلا تمتلك تلك الموصلية التي تمتلكها المعادن المذكورة آنفاً. كما أن هناك ما هو أقل توصيلية مما ذكر وتلك هي اشباه المعادن والتي تحتل العمود الخامس في الجدول الدوري مثل الانتيمون والبزموث. يقع الكرافيت ضمن صنف اشباه المعادن ايضاً. يقع مدى المقاومية الكهربائية للمواد الموصلة بين $10^{-7}$ الى $10^{-2}$ ohm-cm.

جدول (9-1) تدرّج المقاومية الكهربائية (ohm - cm).




أما الصنف الثاني وهي أشباه الموصلات فتقع مقاوميته في مدى $10^5$ الى $10^{-1}$ ohm-cm . ويشكل هذا الصنف الاساس لاجهزة الحالة الصلبه. وتتأثر المقاومية هنا بشكل كبير بالتراكيز القليلة للشوائب. فالجرمانيوم المعالج بمحتوى قليل لأحد الشوائب وبحدود عدة اجزاء من المليون يمتلك مقاومية اقل بمرتبتين عمايمتلكه الجرمانيوم ذو النقاوة العالية جداً. كمايمتلك السليكون النقي مقاومية اعلى مما يمتلكه الجرمانيوم النقي.

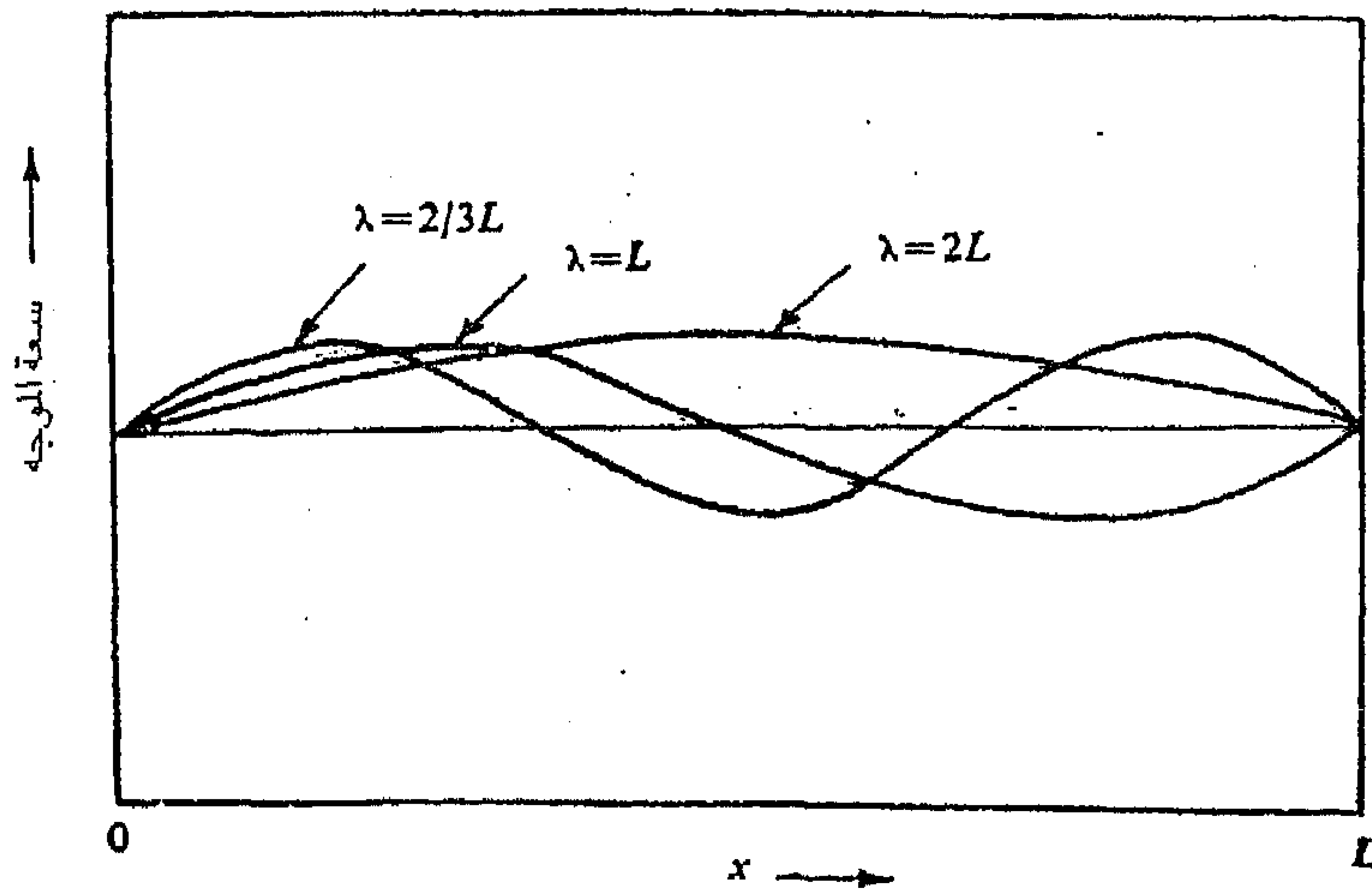
ويدعى الصنف الثالث من المواد بالعوازل . والمواد العازلة المألوفة هي البكالايت (bakelite) واللوسايت (Lucite) والمايكا (mica) وكلوريد البولي فنيل (PVC) والمطاط و البورسلين (Porcelain) . و يقع مدى المقاومية لهذا الصنف بين $10^8$الى اعلى من $10^9$ ohm.cm ويوجد فرق بحدود 13 مرتبة بين القيم الملاحظة لزجاج

السليكا وزجاج الشبابيك و يعزى هذا الفرق الى التوصيلية الايونية لزجاج الشبابيك . فالأيونات الموجبه للصوديوم والكالسيوم الموجوده في زجاج الشبابيك وغير المرتبطة نسبياً تنتشر وتعمل على التوصيل اذا ما قورنت بأيونات السليكون الموجبة غير المتحركة والمرتبطة بشده في السليكا.

## ٣-٩ نظرية الالكترون الحر:

لاتعتبر خواص التوصيل للمادة الصلبة دالة لعدد جميع الالكترونات فيها، حيث ان الالكترونات التي في المدارات الخارجية للذرات فقط لها دور في التوصيل. وتعد الالكترونات الخارجيه في الذرات حسب نظرية الالكترون الحر غير مرتبطة بالذره بل يمكن ان تتحرك بحرية في كل المادة الصلبه . ولذلك سميت هذه الالكترونات بغمامة الالكترونات الحرة او بالغاز الالكتروني الحر او غاز فيرمي (Fermi gas) . يعتبر الفرض الأساس في نظرية الالكترونات الحره هو ان مجال الجهد الناتج من لب الايونات يكون منتظم خلال الماده الصلبه ولذلك فالإلكترونات الحره تمتلك نفس الطاقة الكامنة اينما كانت في المادة الصلبه. تأخذ الطاقة الكامنه قيمة محدودة سالبه نتيجة للجذب الكهربائى بين الإلكترون الحر ولب الايونات وحيث اننا نعنى هنا بفروق الطاقة فقط لذلك يمكن فرض ان هذه الطاقة الكامنه الثابته مساوية للصفر لاجل التبسيط. وعندئذ تكون الطاقة الوحيدة التي تمتلكها الالكترونات الحرة هي الطاقة الحركية. ان الطاقة الحركية هذه اقل بكثير من طاقة الالكترونات المرتبطة في ذره معزولة لان مجال حركة الالكترون يتوسع بصوره ملحوظة في المادة الصلبة مقارنة بالمجال حول ذرة واحدة. ان طول موجه دبرولي (deBroglie) للإلكترونات الحره ذات الطاقة الحركية الاقل تساوي ضعف طول الجسم الصلب الخطي كما في الشكل (9-1) (والمقصود بالجسم الصلب الخطي ان حركة الالكترون ذات اتجاه واحد). وعلى سبيل المثال فالجسم الصلب الذي طوله واحد او اثنين من السنتيمترات، فالطول الموجي في هذه الحالة يكون اكبر في

المقدار بحوالي سبعة الى ثمانية مراتب عما هو عليه في الذره الحرة. والاحتمالية لايجاد الكترون ما عند اي نقطة في الشكل (9-1) تتناسب مع مربع سعة الموجه عند تلك النقطة. ولايعني ذلك ان احتمالية الالكترون تختلف باختلاف الاماكن. ويؤدي حل المعادلة الموجيه الى موجات منتقلة بسرعة ثابتة بحيث ان احتمالية معدل الزمن هي نفسها عند كل نقطة في المادة الصلبة.




**الشكل (9-1) طول موجة دبرولي (deBroglie wavelength) للإلكترونات الحرة القليلة الاولى والتي تمتلك اقل طاقة حركية في جسم صلب خطي بطول L.**

لقد ذكر في الفصل السابع ان لطول موجة دبرولي (λ) علاقة مع زخم الالكترو ن (mv) وكالآتي:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \qquad \text{......... (2-7)}$$

وحيث انه يمكن اهمال معادلة الطاقة النسبية لان سرعة الالكترونات الحرة اقل بكثير من سرعة الضوء لذا يمكن استخدام علاقة الطاقة الحركية (E) التقليدية وهي:

$$E=\frac{1}{2}mv^2 \quad \text{............ (1-9)}$$

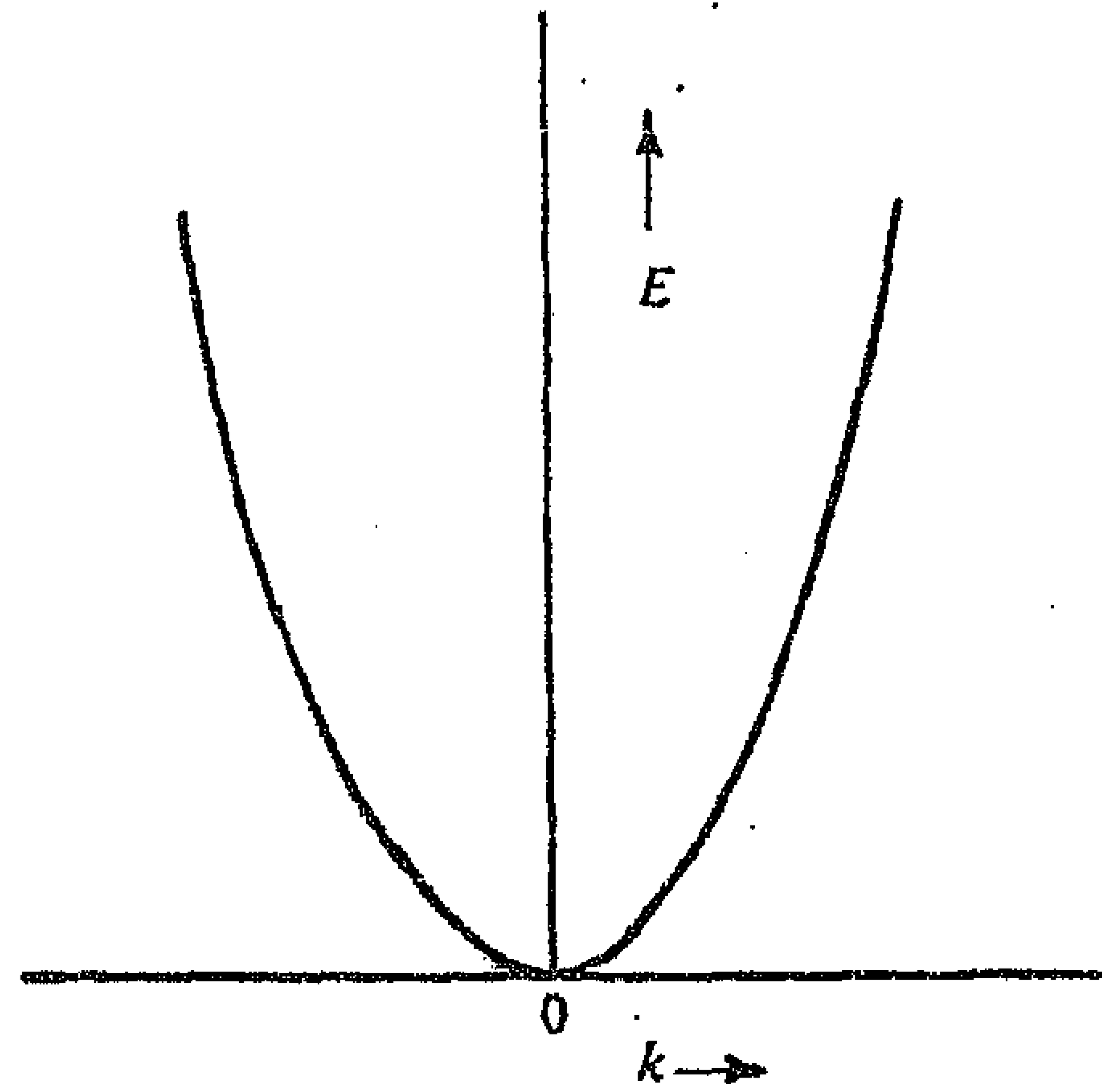
ان لمقدار متجه العدد الموجي (k) علاقة بطول موجة دبرولي وكالآتي:

$$k=\frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{......... (2-9)}$$

ومن العلاقات الثلاث اعلاه يمكن التعبير عن الطاقة الحركية للإلكترون بالآتي:

$$E=\frac{h^2k^2}{8\pi^2m} \quad \text{..........(3-9)}$$

والعلاقة بين E و k على شكل القطع المكافيء كما في الشكل (9-2).




الشكل (9-2) علاقة القطع المكافيء بين طاقة (E) الالكترون الحر وعدده الموجي k .

تنص قاعدة بولي للاستثناء (Pauli exclusion principle) ان الكترونين فقط لها برم (spin)متعاكس يمكن ان يحتلا مستوى كمي معين. تنطبق هذه القاعدة على الالكترونات الحره ايضاً. لذلك كان طول موجة دبرولي لاول الكترونين حرين لهما برم متعاكس مساو لضعف طول الجسم (L) الصلب الخطي وينتج عن ذلك ان المستوى الكمي له اقل طاقة حركية ممكنة. وعند هذه الحالة فإن $k = \frac{\pi}{L}$ . اما المستوى الكمي الاقرب المسموح به فيمتلك $\lambda = L$ (الشكل 9-1) و$k = \frac{2\pi}{L}$.

وفي حالة الاجسام الصلبة المتعادلة كهربائياً فإنالالكترونالحر الذي له سرعة معينه باتجاه واحد سوف يشترك دائماً مع الكترون آخر له نفس السرعة ولكن باتجاه معاكس. وإلا فسيكون هناك سيل من الالكترونات باتجاه واحد حتى في حالة عدم وجود مجال خارجي مسلط. لذلك يأخذ العدد الموجي كلا القيمتين الموجبة والسالبه . فتكون قيمتا (k) لاول مستويين هي $k = \pm\frac{\pi}{L}$ و$k = \pm\frac{2\pi}{L}$ فيمكن القول انه في المعادلة $k = \pm\frac{n\pi}{L}$ يأخذ العدد الكمي n عند الإزدياد المتعاقب قيم صحيحة بحيث ان الالكترونات الحرة تحتل مستويات كمية طاقاتها متزايدة. وعند التعويض عن قيمة k الاخيرة في المعادلة (9-3) نحصل على :

$$E = \frac{h^2n^2}{8mL^2} \qquad \text{....... (9-4)}$$

تأخذ حركة الالكترون اي اتجاه في الفضاء ، في الجسم الصلب ثلاثي الابعاد لذلك يتم التعبير عن $n^2$ بما يعادلها في الاتجاهات الثلاثة ( $n_x^2 + n_y^2 + n_z^2$) حيث تؤول معادلة الطاقة الى الآتي:

$$E = \frac{h^2(n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)}{8mL^2} \qquad \text{...........(9-5)}$$

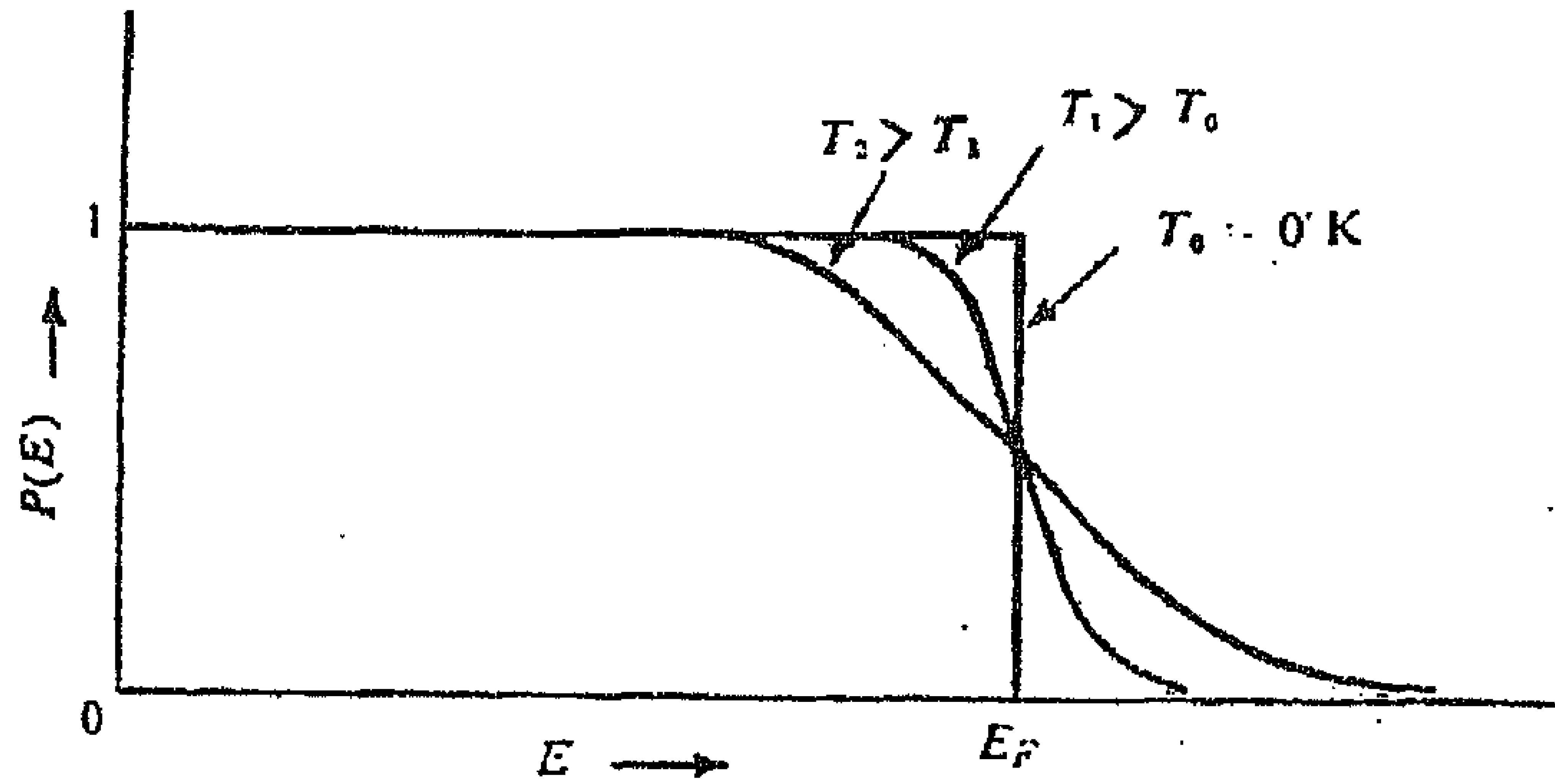
تدعى طاقة اعلى مستوٍ مملوء عند الصفر المطلق في مخطط E-k(الشكل9-2 ) بطاقة فيرمي (Fermi energy) ، $E_F$ . وعند الصفر المطلق تحتل الالكترونات كل المستويات حتى مستوى فيرمي تاركة كل المستويات الاعلى منه خالية . ويكون معدل الطاقة الحركية للإلكترونات تساوي $0.6E_F$ .

اما عند درجة حرارة اعلى من من الصفر المطلق ونتيجة للإثارة الحرارية فهناك احتمالية معينه بان تترك بعض الالكترونات مستويات الطاقة الواطئة لتحتل مستويات اعلى من طاقة فيرمي ($E_F$) . لقد اعطيت هذه الاحتمالية بوساطة احصاء فيرمي وديراك والتي تأخذ بالاعتبار التحديدات الكمية الخاصة بقاعدة بولي للإستثناء.

تعطى احتمالية P(E) الالكترون لان يحتل مستوى طاقة ما (E) بالآتي:

$$P(E)=\frac{1}{1+\exp[(E-E_F)/kT]} \qquad ..........(6\text{-}9)$$

يمكن استخدام هذه المعادلة لايجاد توزيع الاحتمالية عند الدرجات الحرارية الاعتيادية حيث تكون $E_F$ لاتعتمد تقريباً على درجة الحرارة . يتم رسم هذه الدالة P(E) مع الطاقة E ، كما في الشكل (9-3). وعند درجات حرارية مختلفة لجسم صلب له مستويات كميه اعلى من مستوى طاقة فيرمي، يمكن احتلالها من قبل




**الشكل (9-3) توزيع فيرمي– ديراك (Femi- Dirac) عند درجات حرارية مختلفة.**

الالكترون، حيث يتغير توزيع الالكترونات قرب $E_F$ كدالة لدرجة الحراره. يتم تعريف مستوى فيرمي عندئذ، بصوره عامه، بأنه مستوى الطاقة الذي له احتمالية 50% في ان يتم احتلاله من قبل الالكترون عند اية درجة حراريه.

## ٤-٩ التوصيل بوساطة ا الالكترونات الحره:

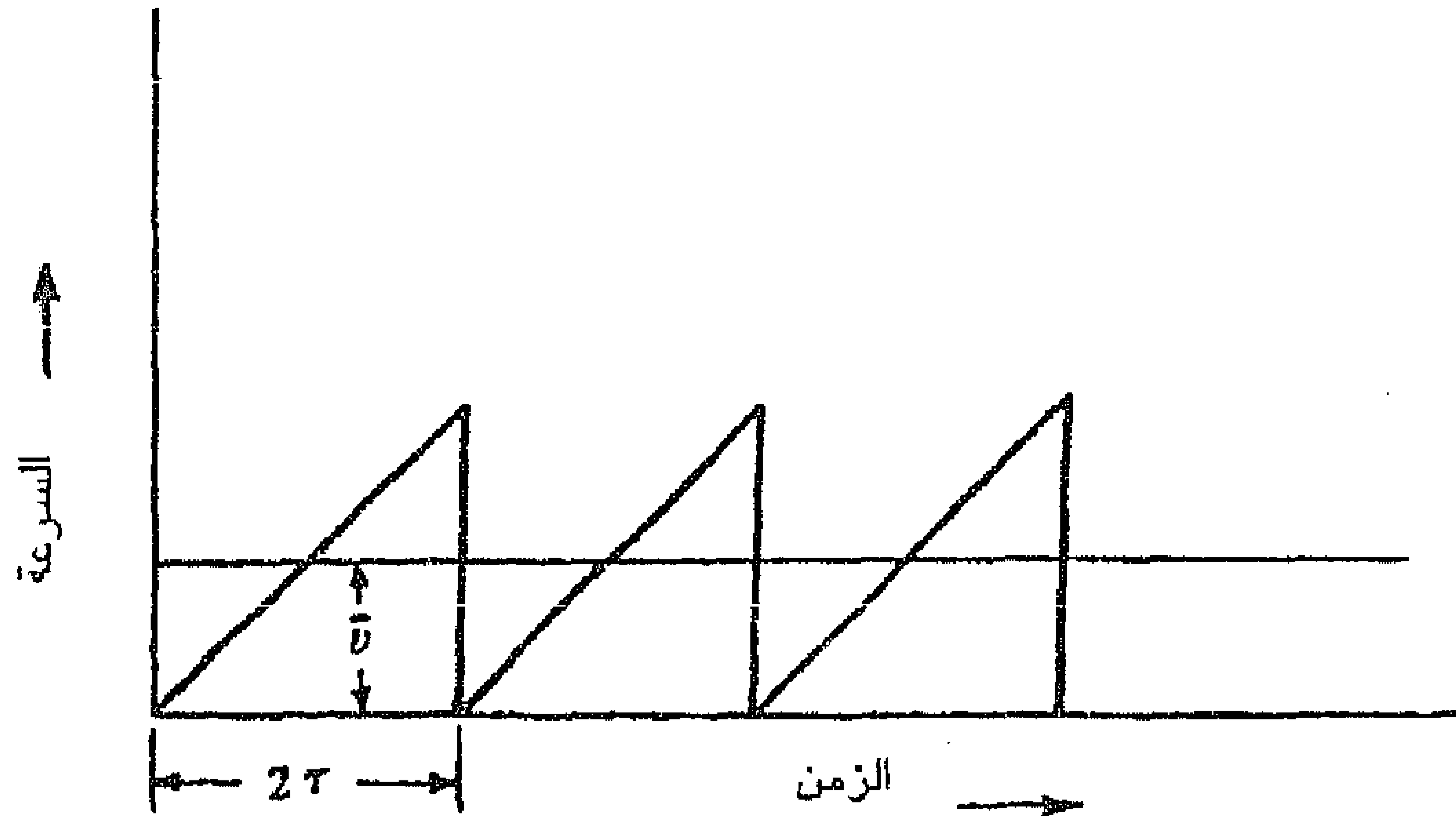
توصل الاكترونات الحرة الكهربائية عندما يتم انحياز توزيع سرعتها المتساوية والمتعاكسة في الجسم الصلب المتعادل بتسليط مجال خارجي ليؤدي الى محصلة سرعة ناتجة باتجاه واحد.يمكن معادلة القوة الناتجة من الكترون شحنتهe في مجال سلط له انحدار مقداره ε volt/cm مع القوة المعرّفة بالقانون التقليدي.

$$\varepsilon e = ma \qquad \text{........... (7-9)}$$

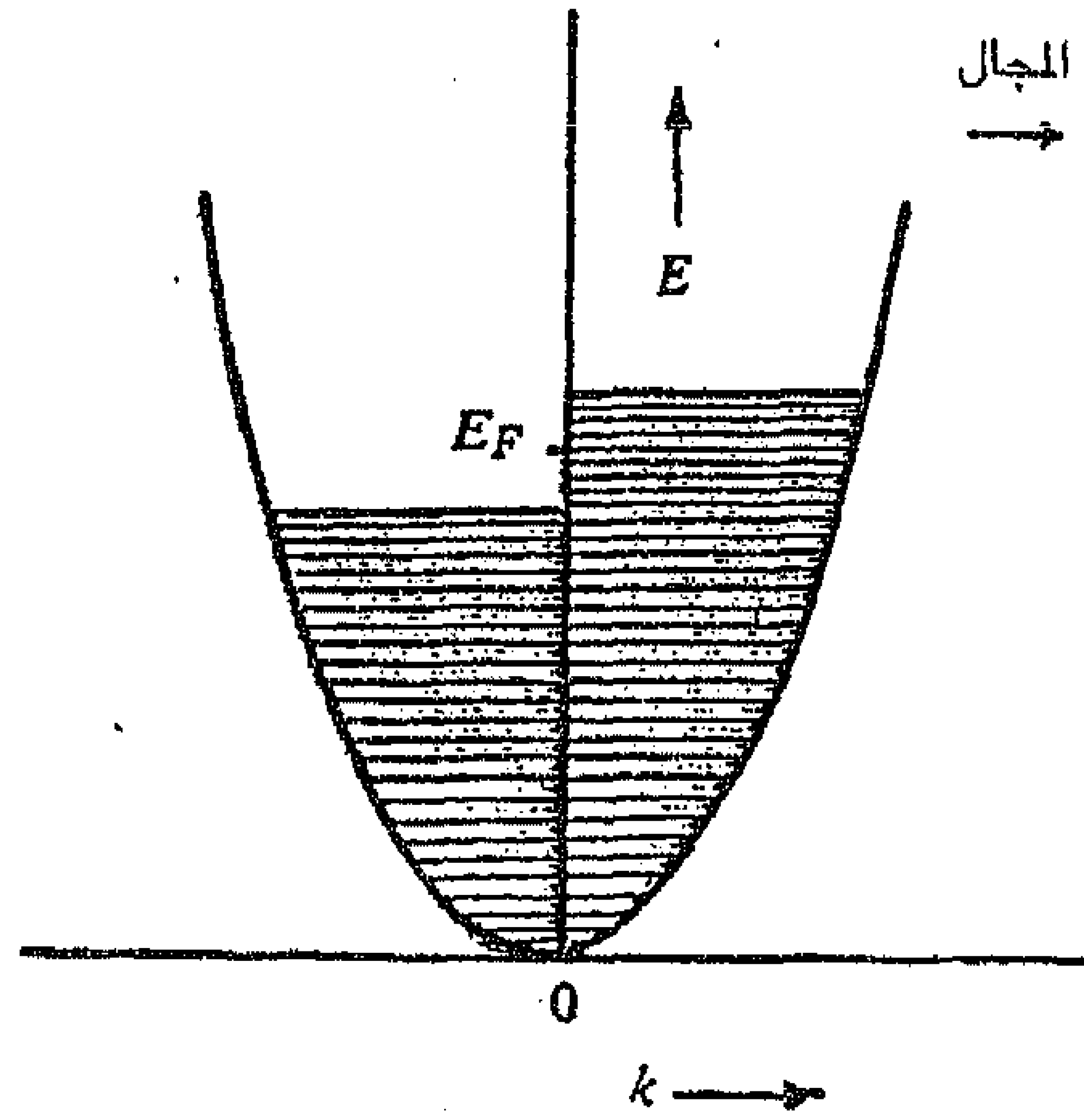
حيث تمثل m كتلة الإلكترون و a التعجيل الناتج من تسليط المجال.

تستمر الالكترونات المعجلة باتجاه المجال بزيادة سرعتها بصوره غير محدوده إذا لم تحدث اصطدامات مع ذرات الشوائب والعيوب البلوريه والفوتونات. واعتماداً على الفترة الزمنية بين تصادمين متعاقبين،يكون لها معدل زيادة بالسرعة باتجاه المجال كما في الشكل (9-4) ويفترض ان يفقد الالكترون اثناء التصادم كل سرعته الزائده التي امتلكها قبل التصادم ، وعند ذلك تتحور العلاقة بين E و k الى التوزيع المبين في الشكل (9-5). تكون سرعة اسرع الكترون باتجاه المجال المسلط اكبر مقداراً من سرعة اسرع الكترون بالاتجاه المعاكس اي ضد المجال المسلط.ومثل هذه الإعادة للتوزيع ممكنة فقط عندما تتوفر آنياً مستويات الكترونية فارغة اعلى من مستوى فيرمي. ومن أهم خواص الموصلات هي توفر مثل هذه المستويات على عكس المواد شبه الموصلة والعازلة.

ولو فرض ان معدل زمن التصادم هو $2\tau$ و $\bar{V}$ معدل زيادة السرعة التي حصلت




الشكل (9-4) السرعة الإضافية التي يتم الحصول عليها من قبل الالكترون بسبب المجال المسلط تُفقد عند الاصطدام بالذره الشائبة او العيوب النقطية او الفونونات.




الشكل(9-5) تحصل الالكترونات المتحركة باتجاه المجال على سرعة اضافية بينما تخسر الالكترونات المتحركة بعكس اتجاه المجال بعضاً من سرعتها.

عليها الالكترونات ، فيمكن كتابة المعادلة (7-9) كالآتي:

$$m = \frac{v}{\tau} = \varepsilon e$$ ................ (8-9)

أو أن

$$\overline{v} = \frac{\varepsilon e \tau}{m}$$ .................. (9-9)

يمكن اعطاء كثافة التيار او التدفق $J_e$ الناتج من الالكترونات بالآتي

$$J_e = ne\overline{v} = \frac{ne^2 \tau \varepsilon}{m}$$ .........(10-9)

n عدد الالكترونات المتحركة و e شحنة الالكترون. ان هذه العلاقة تحاكي صيغة قانون اوم (Ohm`s Law). لاتساوي n عدد الالكترونات الحرة في الجسم الصلب لانه تستطيع الالكترونات القريبة من مستوى فيرمي فقط من زيادة طاقتها الحركية بالانتقال الى مستوى كمي أعلى . وتقدر n بحوالي 1% من مجموع الاكترونات الحره في الجسم الصلب عند درجات الحرارة الاعتيادية.

يتم تعريف الموصلية (σ) بأنها الفيض بوحدة تدرج الجهد، اي ان :

$$\sigma = \frac{ne^2 \tau}{m}$$ ........(11-9)

ان المقاومية الكهربائية (ρ) هي معكوس الموصلية σ اي ان :

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$ ....... (12-9)

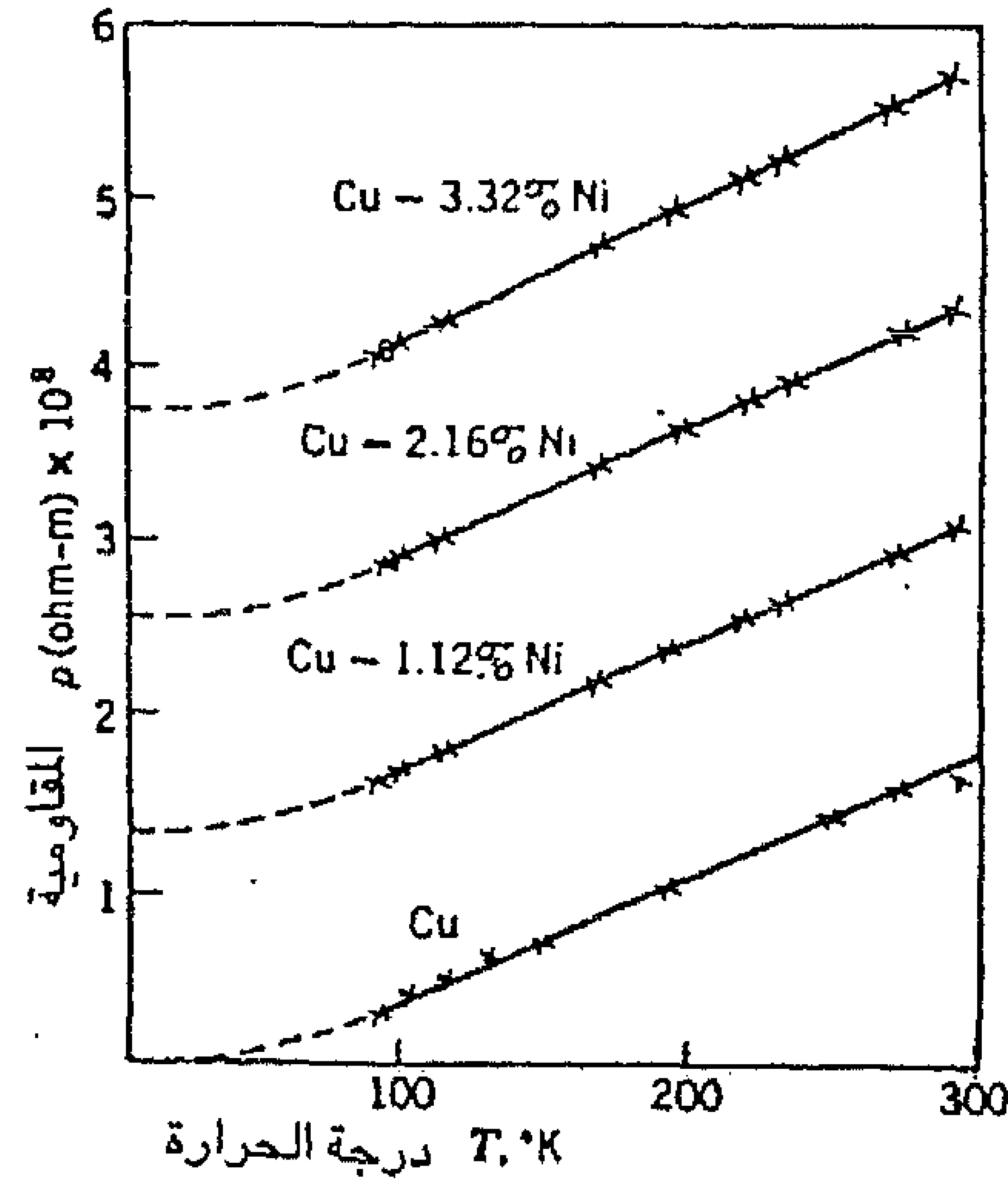
## ٥-٩ عمليات التصادم:

يعرّف معدل المسار الحر "l" (mean free path) للإلكترون بأنه معدل المسافة التي يقطعها الالكترون بين تصادمين متعاقبين . يساوي معدل المسار الحر في البلوره المثالية الخاليه من الشوائب والعيوب مالانهاية عند الصفر المطلق،.ومعنى ذلك انه لايوجد اي تصادم وان الموصلية الكهربائية تساوي اللانهاية . تعتبر الذرات المذابة مراكز استطارة للإلكترونات . فدخول هذه الذرات الى الشبيكه البلورية يؤدي الى التصادمات ومن ثم انخفاض معدل المسار الحروالموصليه. وبالتشابه يزيد وجود الخلل النقطي والانخلاعات والحدود البلورية من استطاره الالكترونات ويقلل الموصلية . ان الخلل النقطي (point defects) (ومن ضمنها الذرات المذابة ) هي مركز استطاره أكثر فعالية من أنواع الخلل الاخرى.

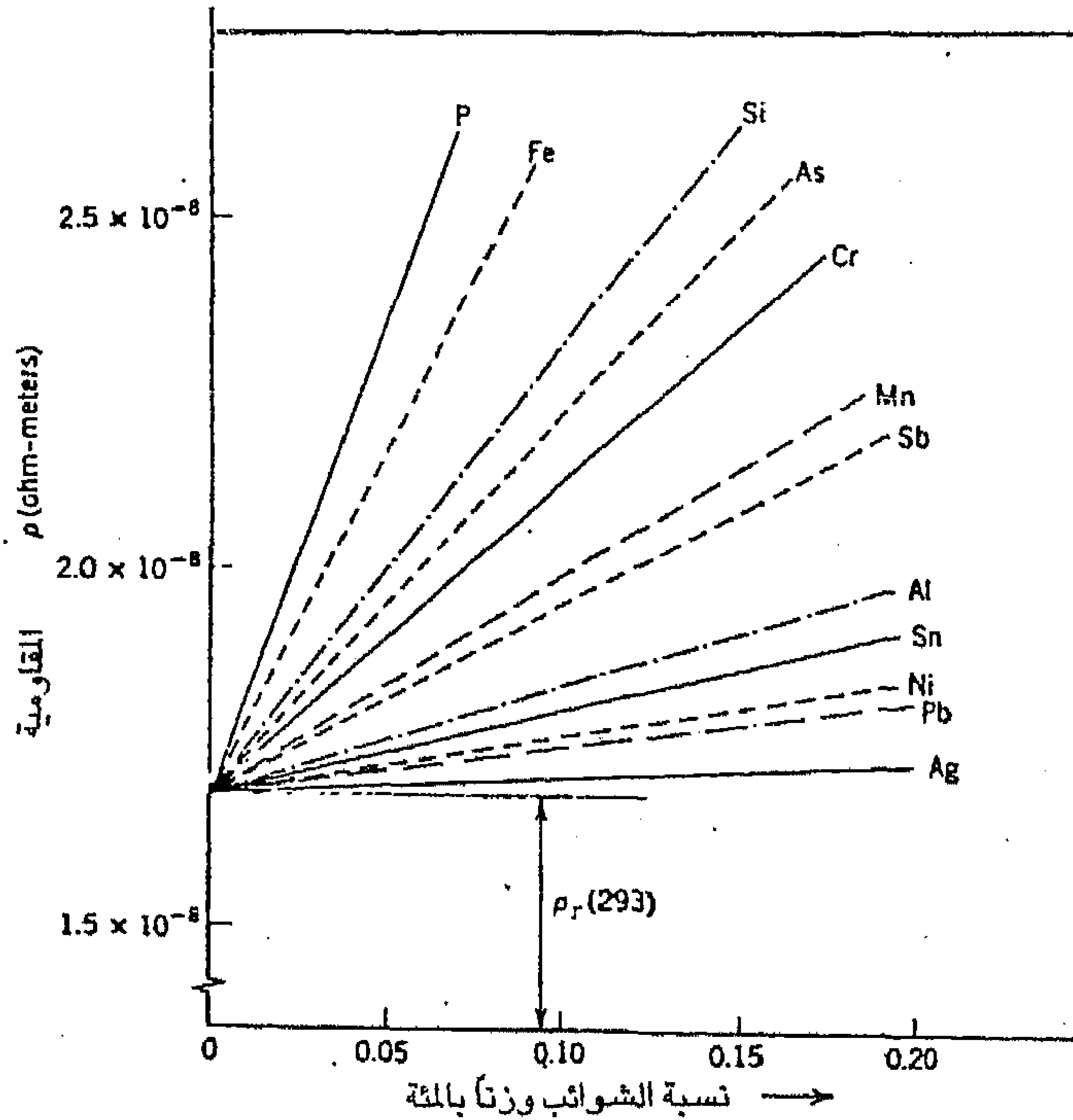
يستطير الفونون (هو كم من الطاقة المرنة اوالاهتزاز في النسق البلوري) الالكترونات ايضاً. يؤثر او يشوش اهتزاز الذرات العشوائي حول معدل اماكنها في البلوره التكرار المثالي فيها ويتداخل مع حركة الالكترونات وقد وجد أن زمن التصادم عند درجات الحرارة الواطئة يتناسب مع مكعب مقلوب درجة الحرارة المطلقة. اما عند درجات الحرارة العالية، اعلى من درجة حرارة دبي "Debye"*, فإن زمن التصادم يتناسب مع مقلوب درجة الحرارة المطلقة. يبين الشكل (9-6) تغيّر المقاومية الكهربائية (ρ) مع درجة الحرارة للنحاس النقي الحاوي على قليل من الخلل في الشبكة البلورية. ويظهر ان التغيير تكعيبي عند الدرجات الحرارية الواطئة وخطي عند الدرجات العالية. تزداد المقاومية عند اضافة النيكل الى النحاس كذرات مذابة في الشبكة البلوريه. للنحاس. تتناسب الزيادة في المقاومية مع تركيز الذرات المذابة، ضمن مدى التراكيز القليله، بصوره خطيه. يختلف تأثير العناصر المذابة على مقدار مقاومية معدن معين. يبين الشكل (9-7) تأثير عدد من العناصر المذابة في النحاس وبتراكيز مختلفة و قليلة نسبياً وعند درجة حرارة الغرفة.

---

* هي الدرجة الحرارية التي فوقها لاتعتمد السعة الحرارية عند الحجم الثابت (Cv) على درجة الحرارة، وتكون قيمتها اقل من درجة حرارة الغرفة للعديد من المواد الصلبه.




الشكل (9-6) المقاومية الكهربائية لسبائك Cu-Ni اضافة الى النحاس النقي كدالة لدرجات الحراره.




الشكل (9-7) تأثير إضافة كميات قليله من عناصر مختلفة على المقاومية الكهربائية (ρ) للنحاس عند درجة حرارة الغرفة.

وحيث ان المقاومية المتخلفة "$\rho_\tau$" او المتبقية (residual resistivity) تتولد نتيجة لاستطارة الالكترون من قبل الشوائب والخلل في النسق البلوري، فإنها تتأثر اذن بتغيير توزيع الذرات المذابة اضافة الى تركيزها. وهي تتأثر ايضاً بالتشويه على البارد والاخماد (quenching) او التشعيع النيوتروني (neutron irradiation) . تؤدي كل هذه العمليات الى ادخال مقدار اكبر من الفراغات (va- cancies) والإنخلاعات (dislocations) او الذرات البينيه (interstitial atoms) الى الشبكة البلوريه. يمكن ان تخفض المعاملات الحرارية المقاومية لانها تقلل او تغيّر توزيع مجموع الخلل البلوري. ولذلك تستخدم تقنية المقاومية عادة لتعيين معدل و مقدار التغيير في البنيه الناتج من العمليات الحرارية او الميكانيكية للمعدن.

لقد سبق التكلم في الفصل الثاني عن علاقة مقاومة المعدن بدرجة الحرارة. ففي المعادن النقية والسبائك المنخفضة التراكيز يكون مجموع المقاومية (تتناسب المقاومة مباشرة مع المقاومية لمعدن ما عند ثبوت الظروف) هو حاصل جمع حدين اولهما المركبة الحرارية للمقاومية $\rho_L$ والتي تنشأ من اهتزازات الشبكه البلوريه وثانيهما $\rho_\tau$ المقاومية المتخلفه، والتي تنشأ من وجود الذرات المذابه والخلل في البنيه البلورية.

يبين الشكل (9-6) ايضاً تغيّر المقاومية مع درجة الحرارة لثلاث سبائك تحتوي على %1.12 و %2.16 و %3.32 من النيكل. يؤدي ايصال منحنيات المقاومية للسبائك الى الصفر المطلق الى الحصول على المقاومية المتخلفة ($\rho_\tau$) والتي تعزى، كما ذُكر، الى وجود الذرات المذابة فقط اذا افترضنا قلة او عدم وجود العيوب في الشبيكة البلورية او خلو الشبيكة من الحدود البلورية، وهذا يلغي دور استطارة الفونون (phonons) للإلكترونات.تصف قاعدة اضافة المقاومية لما تيسن (Mat- thiessen`s rule) السلوك اعلاه ويمكن كتابتها بالآتي:

$$\rho_M = \rho_L + \rho_\tau \qquad \text{............ (13-9)}$$

وأن:

$$\rho_{\tau} = \rho_D + \rho_s \qquad \text{..........} (14\text{-}9)$$

اذن:

$$\rho_M = \rho_L + \rho_D + \rho_s \qquad \text{...........} (15\text{-}9)$$

حيث تمثل :

$\rho_M$ مقاومية المعدن الكلية

$\rho_L$ مركبة المقاومية (معامل الاستطاره) المعتمده على درجة الحرارة وتسمى مقاومية الشبيكة البلورية (Lattice resistivity) .

$\rho_D$ مركبة المقاومية (معامل الاستطارة) الناتجة من العيوب الموجودة في الشبكه البلورية اضافة الى الحدود البلوريه.

$\rho_s$ مركبة المقاومية (معامل الاستطارة) الناتجة من وجود الذرات المذابة. ويفترض ان لاتعتمد $\rho_D$ و $\rho_s$ على درجة الحرارة.

## ٦-٩ بعض تطبيقات المقاومية الكهربائية:

ان التطبيقات التي لها علاقة بالمقاومة الكهربائية او المقاومية كثيرة كخطوط نقل القدرة الكهربائية العالية التي تتطلب مقاومية واطئة جداً ومقاومة ميكانيكية عالية. ومواد التماس او الربط الكهربائى التي تتطلب الى جانب الموصلية الكهربائية العالية، نقطة انصهار عالية ومقاومه عالية للتأكسد اضافة الى موصلية حراريه عاليه ايضاً. والمقاومات العيارية التي لاتتغير قيمها بتغير درجة حرارة الجو اي ان لها معامل حراره للمقاومة واطء جداً. لقد تم، في ا لسنوات الاخيرة، صنع مقاومات الاغشية الرقيقة. والتي لها خواص مقاومية تختلف عن جرم المادة المصنوعة منها وذلك لأن معدل المسار الحر هو بحدود سمك الغشاء الرقيق . وعناصر التسخين كما في افران المقاومة الكهربائية وغيرها والتي تتطلب نقطة انصهار عالية ومقاومة جيدة للتأكسد. ومحارير المقاومة الكهربائية ، وقد تمت الاشارة اليها في الفصل

الثاني، والتي تتطلب معامل حراره للمقاومة عالي لاجل الحساسية العالية لدرجات الحرارة، كما في حالة معدن البلاتين النقي.

إلا أن التطبيقات الاكثر اهمية في حقل هندسة المعادن والمعاملات الحرارية، هو أنه يمكن متابعة الترسب في حالة التصليد بالترسيب (precipitation hardening) وقياس الكسر الحجمي (volume fraction) للترسبات بتقنية قياس المقاومية الكهربائية في كل حالة من الحالات وعند درجة حرارة منخفضة (على سبيل المثال درجة غليان النيتروجين المسال 77K او حتى درجة غليان الهيليوم المسال 4.2K في بعض الاحيان) وذلك لتقليل وتثبيت $\rho_L$ في حالة عمل نموذج ملائم لذلك. ومن المعلوم ان قياس الكسر الحجمي يتطلب اجراء القياسات على عدة صور للنموذج مأخوذة اما بالمجهر الضوئي. وهذا نادر ، او بالمجهر الالكتروني النافذ ولايخفى مافي ذلك من صعوبة مصاحبة لهذه العملية، عند تحضير العينات وخصوصاً عند استخدام المجهر النافذ. ولذلك كانت متابعة عملية الترسب وقياس الكسر الحجمي بطريقة المقاومية اسهل بكثير وتتم على اساس قاعدة ماتيسن اي انه كلما كان مقدار الترسب اكبر (اي كلما خرجت كمية اكبر من الذرات المذابة خارج المحلول الجامد) كلما قلّت المقاومية وبعد اجراء المعايره يمكن استخراج الكسر الحجمي عند اي حاله من الحالات والى درجة جيده من الدقه.

### ٧-٩ مقاييس الانفعال الكهربائية Electric Strain Gauges :

وهي احدى تطبيقات المقاومة الكهربائية ،لكنه نظراً لاهميتها في الفحص افرد لها بند خاص.

ولو فرض ان المقاومية مقدار ثابت لكل مادة عند الظروف المعينه فإن مقاومة اي سلك من اية سبيكة دالة لطوله ومقطعة العرضي وكالآتي:

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (16\text{-}9)$$

حيث يمثل R مقاومة السلك و L طوله و A مساحة مقطعه العرضي .

يتبين من ذلك أنه إذا أزداد الطول او قلّت مساحة مقطعه فإن مقاومته تزداد.

تعتمد نظرية مقاييس الانفعال الكهربائي بالتعبير عن الازاحة بدلالة التغيير في المقاومه الناتج عنها ومن ثم تقدير القوى الخارجيه التي يتعرض لها الجسم . فقد لوحظ تغيّر مقاومة الموصلات المعدنية بصوره خطية مع التشويه الحاصل فيها. لقد تم تطوير مقاييس الانفعال في السنوات الاخيرة، وبالرغم من صغر مساحة مقاييس الانفعال التي لاتتجاوز سنتمترات مربعة قليلة فإنها تجد مجالات واسعة لقياس اي نوع من انواع الانفعال بدءً من الا نفعال المستقر (الستاتيكي) وانتهاء بالإنفعال بذبذبات تتجاوز العشرات. ان المقادير الفيزياوية كالإزاحة والاجهاد والضغط والتحميل والعزم .. يمكن ان تقاس بها حيث تتحول هذه الكميات الى مقادير كهربائية يمكن من ثم قياسها بسهولة.

يشمل مجال استخدام مقاييس الانفعال السفن والطائرات والمكائن والهندسة المدنية والانشاءات ووسائط النقل وغيرها.

يمكن ان تكون مقاييس الانفعال بهيئة سلك دقيق او رقائق معدنية او مواد شبه موصلة ، ومهما كان نوع سلك الانفعال فلابد ان تتوفر فيه الشروط التالية:

١– تكون حساسيته باتجاه التغيير النسبي في المقاومة اكبر ما يمكن .

٢– ان تكون المقاومة الكلية لمقياس الانفعال اصغر مايمكن.

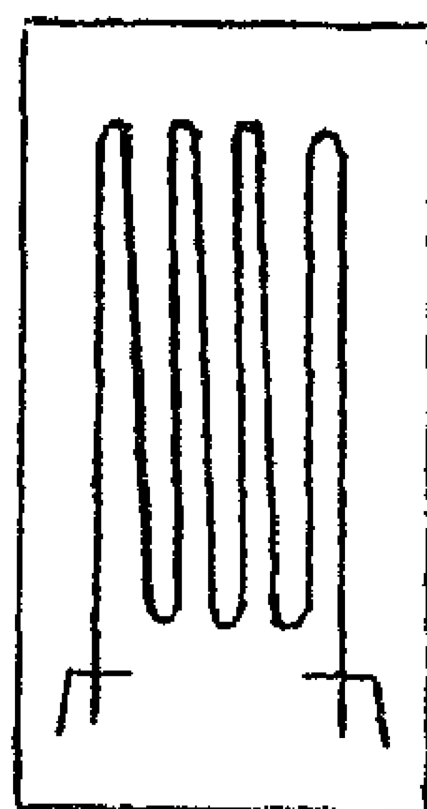
٣– ان يكون معامل تمدده الحراري صغير لكي تنخفض الانحرافات الى اقل مايمكن.

٤– ينبغي ان لايظهر التأثير الكهربائي الحراري في مناطق الاتصال مع المصدر.

٥– ان تبدي الماده المصنوع منها المقياس علاقة خطية بين تغيّر الانفعال والمقاومة.

ان أفضل السبائك المستخدمة في هذا المجال هي سبيكة الادفانس والتي تتكون من معدني النيكل والنحاس واهم ميزاتها هي العلاقة الخطية بين التشويه النسبي وتغيّر المقاومة وكذلك معامل التمدد الحراري القليل.

ان أساس المقياس هو سلك دقيق يتراوح قطره بين 20-30μm بشكل مشبك ملصوق على قاعده عازله كما في الشكل (9-8) حيث يتم لصق مقياس الانفعال هذا على الجزء المراد فحصه. وعند تعرّض الجزء الى التشويه ينتقل ذلك بدوره الى سلك مقياس الانفعال في حالتي الشد والإنضغاط حيث يؤدي الاجهاد عند الشد الى زيادة طوله قليلاً بينما يؤدي الانضغاط الى عكس ذلك . يتم قياس التغيير الحاصل في مقاومة السلك بوساطة اجهزة الكترونية خاصة تكون معايرتها متناسبة مع مقدار التغيير في الطول $\frac{\Delta L}{L}$ . يمكن استخدام مقياس الانفعال في الاجزاء ذات الأشكال غير المنتظمة نظراً لصغر مساحتها وخفة وزنها .



**الشكل (9-8) صورة تخطيطية لاحد مقاييس الانفعال.**

ان العلاقة بين $\frac{\Delta R}{R}$ و$\frac{\Delta L}{L}$ هي علاقة خطيه في معظم المواد المستخدمة .

يمكن استخدام مقاييس الانفعال لقياس التغيير النسبي في الطول $\frac{\Delta L}{L}$ من

حوالي $1x10^{-6}$ لغاية $4x10^{-2}$ .

تنتشر حالياً مقاييس انفعال مصنوعة من رقاقة معدنية (سمكها بحدود 10μm) بدلاً من السلك الدائري المقطع. ونظراً لان المساحة السطحية للموصل المستطيل المقطع هي اكبر من المساحة السطحية للسلك الدائري عند تساوي مساحة مقطعيهما فإن عدداً من مواصفات مقياس الانفعال المصنوع من رقاقة معدنية افضل من نظيراتها السلكية وتتميز في قابليتها على أشعاع الحراره المتولدة مما يساعد على زيادة التحميل واستخدام تيار اعلى مما يزيد من حساسية المقياس اضافة الى تحقيق تماس افضل بين سطح الموصل وبين العازل الورقي الخاص المثبت عليه.

ان العلاقة بين التشويه النسبي وتغيّر المقاومة كالآتي:

$$\frac{\Delta R}{R} = K.\varepsilon \qquad ................ (17\text{-}9)$$

ε الانفعال او التشويه النسبي

K ثابت مقياس الانفعال وقيمته تتراوح بين 1.5 الى 2.5, $\frac{\Delta R}{R}$ التغيّر النسبي في المقاومة.

كما أنه ضمن حدود المرونه فإن.

$$\sigma = E\,\varepsilon \qquad ...........(18\text{-}9)$$

σ هو الاجهاد و E معامل المرونة .

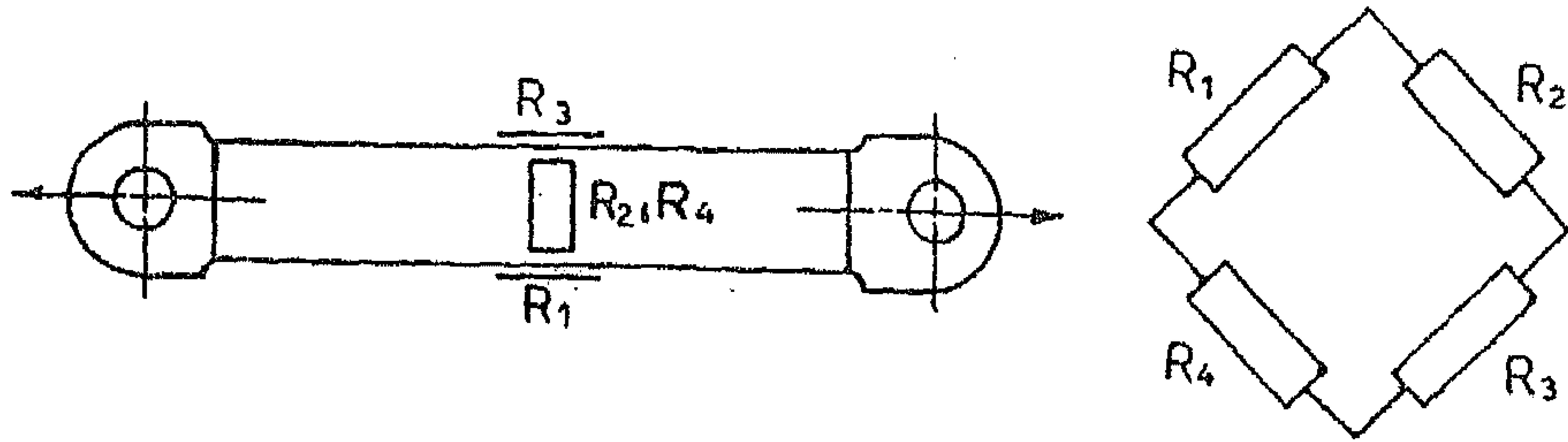
ومن المعادلتين (9-17) و (9-18) يمكن حساب الاجهاد وكالآتي:

$$\sigma = \frac{E}{K} \cdot \frac{\Delta R}{R} \qquad ........... (19\text{-}9)$$

بعض الامثلة في استخدام هذه المقاييس:

لقد ذكر ان مقاييس الانفعال تستخدم بصورة واسعة لقياس القوى والعزوم والضغط والازاحة والانفعالات وغيرها من المقادير الفيزياوية الاخرى. وفي كل الحالات يتم تحويل التأثيرات الميكانيكية المسببه للإنفعال في الجزء المرن الى اشارات كهربائية بوساطة مقياس الانفعال الملصق على الجزء.

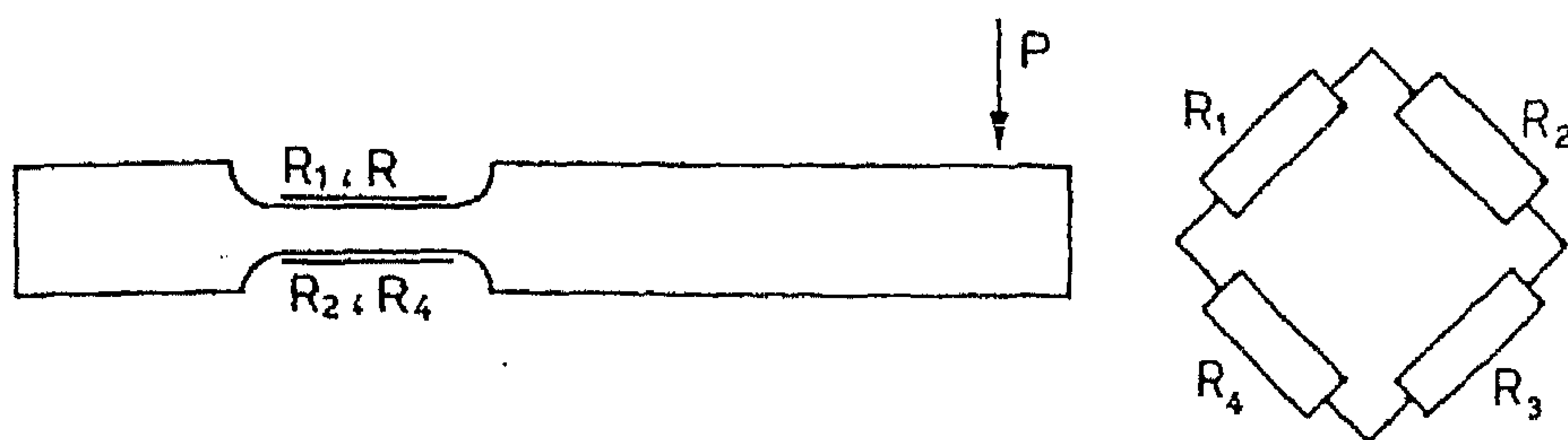
فلقياس قوة الشد، الشكل (9-9) ، يتم لصق مقياسي الانفعال $R_1$ و $R_3$ بموازاة المحور ويعتبران العنصران الرئيسيان في الجهاز المبين في الشكل (9-9) . اما المقياسان $R_2$ و $R_4$ فيلصقان باتجاه عمودي على المحور لأجل التعويض الحراري. ونظراً لكون مقياسي الانفعال $R_1$ و $R_3$ ملصقان على جهتين متقابلتين من المحور ومرتبطان كهربائياً الى فرعين متقابلين من قنطرة ونستون الكهربائية ، فلن يظهر التأثير الآني للثني الذي قد يحصل وبذلك تظهر قوة الشد فقط. تتم ملاحظة مقطع المحور بحيث لايصل الانفعال الاقصى الى حد المرونة. كما وينبغي اختيار مادة المحور بحيث يكون التأثير الحراري على المرونة اقل مايمكن.




**الشكل (9-9) منظومة مقاييس انفعال لقياس قوة الشد.**

اما استخدام مقياس الانفعال لقياس قوة الحني ، على سبيل المثال، الشكل (9-10) فإن الاجزاء المرنه المحمله باتجاه محورها الطولي لا تكون ملائمة لقياس القوة

الصغيرة بصوره خاصة . ولغرض الحصول على حساسية ملائمة، نسبة الى الأجزاء المستخدمة الاخرى فمن الضروري استخدام مقطع عرضي صغير نسبياً والذي يعتبر اكثر ملاءمة لقياس الاجزاء المعرضة للإجهاد بالحني.




**الشكل (9-10) منظومة مقاييس انفعال لقياس قوة الحني.**

تلصق مقاييس الانفعال في الجهاز (الجزء) المبين في الشكل (9-10) بحيث يكون فيه كل من $R_1$ و $R_3$ لقياس الشد بينما يكون كل من المقياسين $R_2$ و $R_4$ لقياس الانضغاط . يؤدي جمع اشارات مقاييس الانفعال المنفرده الى حساسية قياس مضاعفة بأربعة اضعاف والى تعويض حراري كامل.

وهكذا يمكن استخدام مقاييس الانفعال لقياس بقية الكميات الميكانيكية آنفة الذكر.

## ٨-٩ قياس عمق الشق (Crack depth measurement) :

ان من خواص التيار المتناوب (alternating current) انه إذا مرّ في جسم موصل فإنه يمر عبر الطبقات السطحية للجسم.وكلما زاد تردد (frequency) التيار فإنه يقترب من السطح أكثر فأكثر.ويمكن قياس فرق الجهد (Potential difference) او

الفولتيه (voltage) بين اي نقطتين على السطح أثناء مرور التيار الكهربائي بوساطة قطبين يوضعان على النقطتين المراد قياس فرق الجهد بينهما. فإذا كانت المسافة بين القطبين ثابتة، فستكون الفولتيه عندئذٍ متساوية إذا كانت الطبقات السطحية للمادة متجانسة وخالية من العيوب.

أما عند وجود شق (crack) ،على سبيل المثال، فإن التيار يجب ان يمر عبر مسافة اطول ، اي بمحاذاة الشق،ليصل الى القطب الثاني ويكمل الدوّرة الكهربائية. وهذا يعني ان التيار سيعاني مقاومة اكثر عند مروره عبر الطريق الاطول ، لأن المقاومة تتناسب طردياً مع طول مسار التيار في المادة الواحدة عند ثبوت المقطع العرضي لها (المعادلة 9-16). فإذا وضع القطبان الخاصان بقياس الفولتيه عبر طرفي الشق فإن الفولتيه المسجلة ستكون اكبر وذلك حسب قانون اوم (Ohm`s Law) في الكهربائية وهو :

$$V = i\,R \qquad \text{............ (20-9)}$$

حيث تمثل :

i مقدار التيار (ثابت في هذه الحالة) (امبير) .

V مقدار فرق الجهد او الفولتيه (الفولت) .

R المقاومة الكهربائية (أوم) .

ومن هنا يتبين انه كلما زاد عمق الشق زاد فرق الجهد (V)وبصوره طردية.

فإذا تم عمل معايره بين مقدار الفولتيه واعماق الشقوق القياسية (standard cracks) الموجوده في القطعة المعدنية الخاصة بالمعايره امكن عندئذ قياس عمق اي شق موجود في القطعة المراد قياس عمق الشق فيها. ومن الجدير بالذكر ان مقاومية (Resistivity) المادة المراد قياس عمق الشق فيها ومقاومية قطعة المعايره يجب ان تكون متساوية وإلا كانت النتائج غير مضبوطة.

لقد تم تصميم مجس خاص لهذا الغرض مع الدوائر الكهربائية اللازمة لتنفيذ ذلك كما في الشكل (9-11) .

اما في حالة كون الشق مائلاً (ليس باتجاه عمودي على السطح) كما في الشكل (9-12) حيث تكون.

$$T = L \cos \alpha \qquad ........... (9-21)$$

حيث تمثل:

T البعد العمودي بين نهاية الشق والسطح.

L طول الشق .

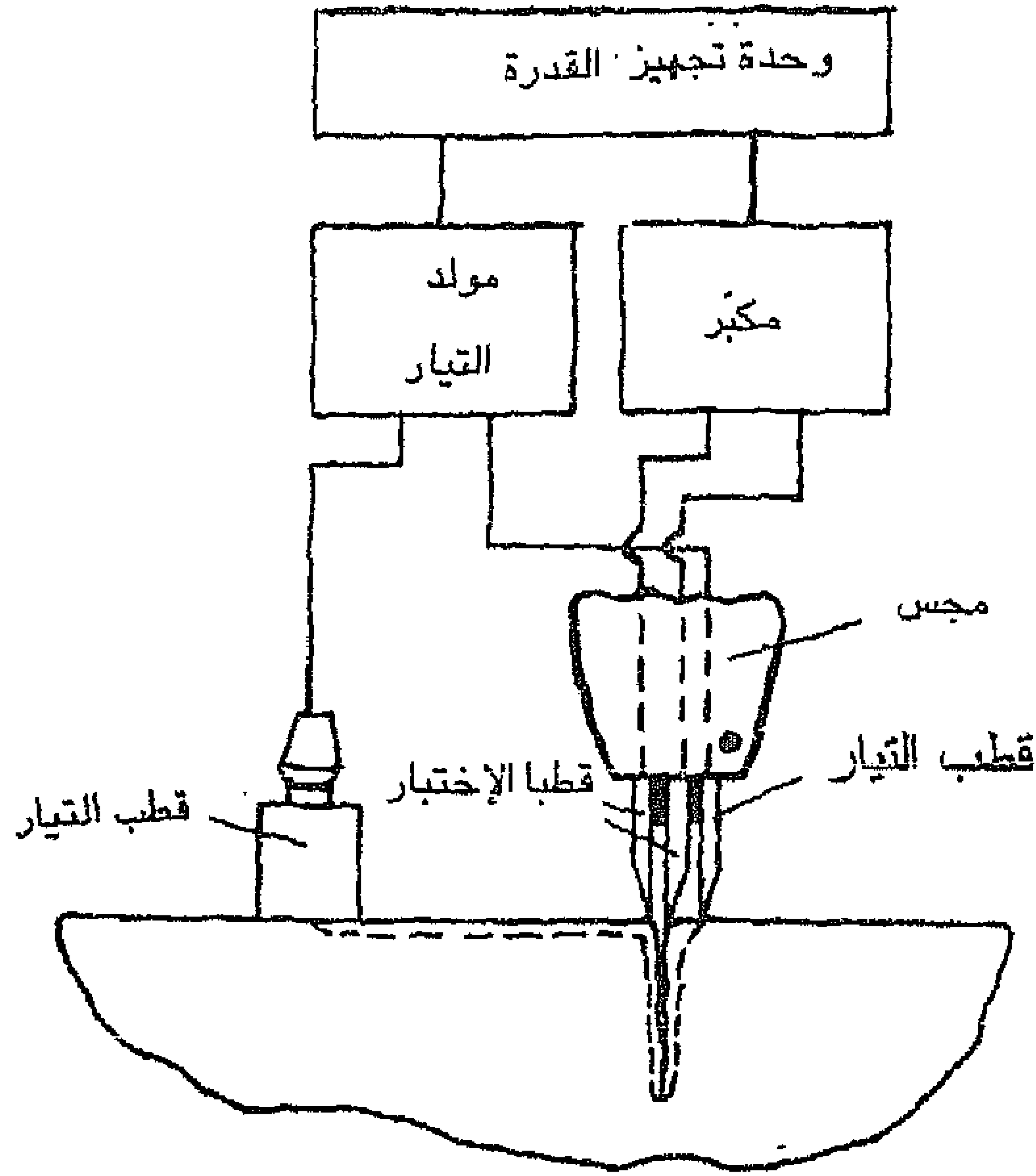
$\alpha$ زاوية الميل بين العمود على السطح والشق.

فيلزم اعادة الفحص مرة ثانية ولكن بعد عكس الاقطاب (أي بتدويرها بزاوية $180^\circ$) ثم أخذ القراءه ثانية.فإذا كانت القراءتان غير متساويتان دلّ ذلك على ان اتجاه الشق يميل بزاوية (غير $90^\circ$) عن السطح (الشكل 9-13) . وفي الحالة الاخيرة اذا فرض ان مقدار القراءة الاولى A ومقدار القراءة الثانية، بعد عكس الاقطاب ، هو B فقد لوحظ علاقة تجريبية تربط بين A و B و T هي:

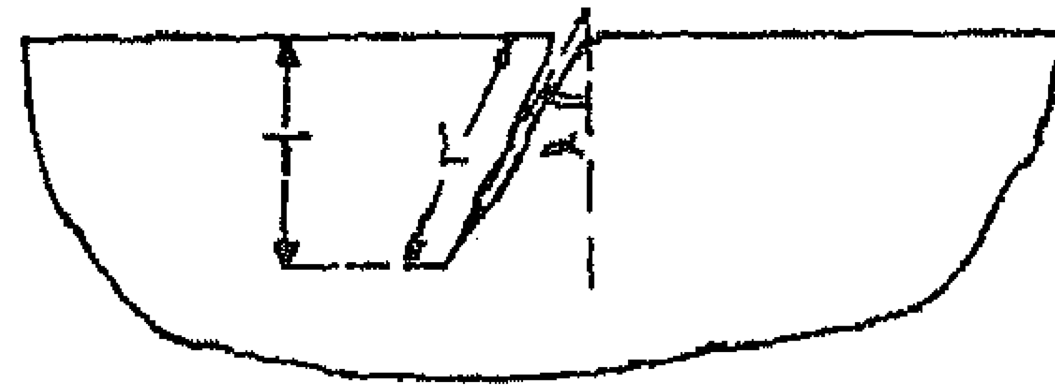
$$T \approx \frac{B^2}{A} \qquad ......... (9-22)$$

ويمكن تفسير اختلاف القراءتين في حالة الشق المائل بسبب اختلاف طول مساري التيار المتناوب في الحالتين كما في الشكل (9-13) . أما سبب الاختلاف في طول المسارين فهو ان التيار المتناوب عالي التردد يميل الى المرور قرب السطح، كما تم ذكره، أما الخاصية المعاكسة فهو انه يميل الى المرور في الطريق الاقصر وذلك لصغر مقاومته. اذن هناك سببان متعاكسان وفي النتيجة ان التيار سيمر في الحاله الثانية بطريق وسط ($S_2$) أقصر مـن الطـريق الأول ($S_1$) وبما أن $S_1 > S_2$

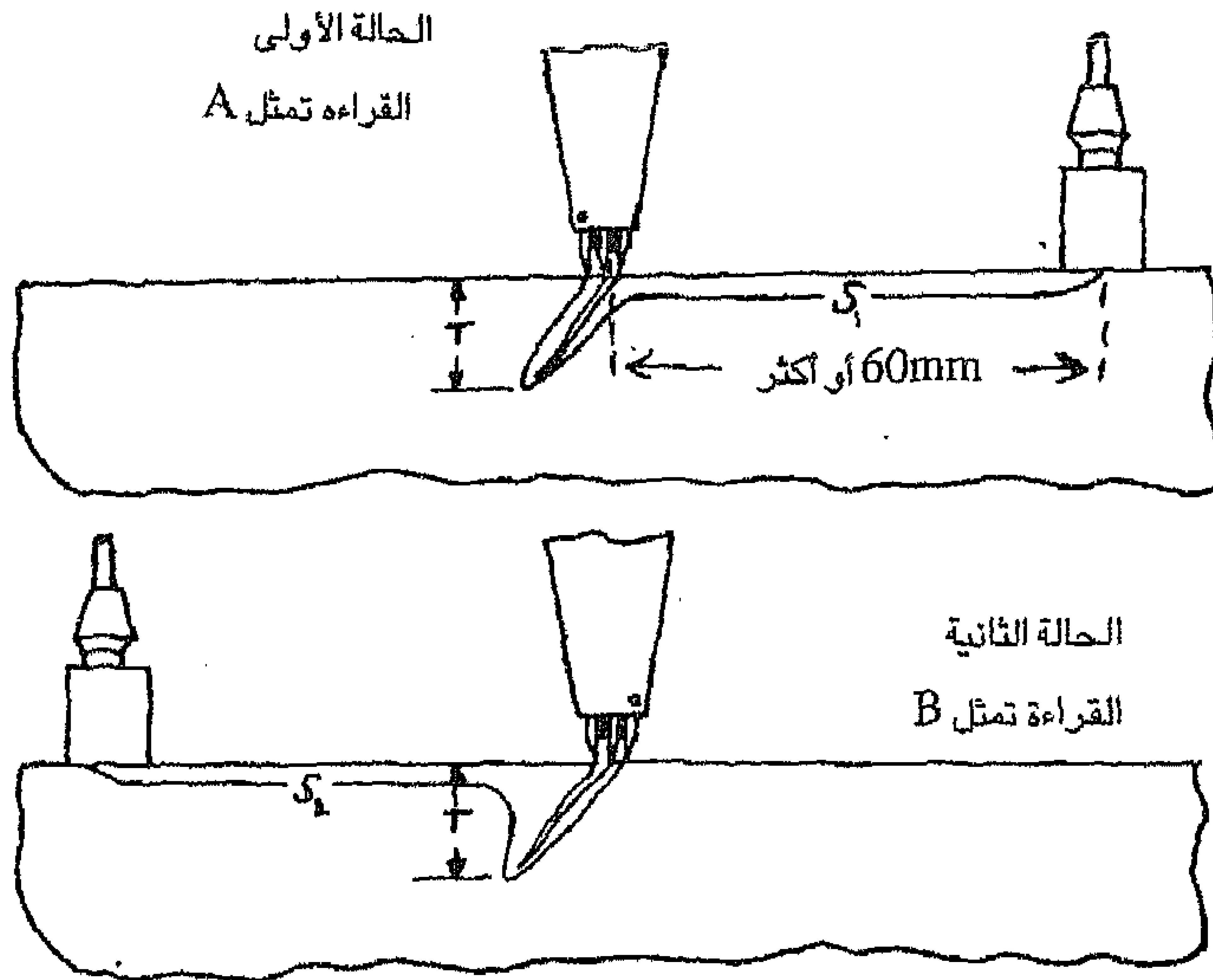
فستكون: $A > B$




الشكل (9-11) رسم تخطيطي يوضح مبدأ قياس عمق الشق العمودي مع الاجهزة اللازمة لذلك.



الشكل (9-12) يوضح الشق المائل بزاوية α مع العمود.




الشكل (9–13) حالتا القياس في الشق المائل والفرق في طول مساري التيار.

$A>B$ فتكون $S_1>S_2$ لأن $T \approx \frac{B^2}{A}$

## العوامل التي تؤثر علي دقة القياس:

## Factors affecting precision of Measurement

١- تنظيف سطح القطعة المراد اختبارها.

٢- ان تكون اقطاب المجس مدببه قدر الامكان.

٣- معايرة الجهاز باستخدام قطعة معايره من نفس المادة المراد فحصها.

٤- تؤثر حواف (edges) القطعة على القراءات إذا كانت الشقوق مائله باتجاه الحافة وقريبة منها.

٥- اذا اريدت المقارنة بين شق ذو عمق كبير يصل الى قرب نهاية السطح الثاني للقطعة المراد فحصها وبين شق ذو عمق صغير فسيحصل حيود في القراءة نحو القيمة الاكبر في حالة الشق الكبير.

٦- يجب ان تكون المسافة بين قطب التيار الثاني (المنفرد) والمجس الثلاثي او الشق المراد قياس عمقه لاتقل عن 60mm، كما في الشكل (9-13) على سبيل المثال، كما يجب ان يكون قطبي التيار على طرفي الشق (اي كل على جهة منه).

# تمارين الفصل التاسع

١- ما المقصود بالمقاومة الكهربائية والمقاوميه.

٢- على أي أساس تتدرج المواد في مقاوميتها ، والى كم مجموعة يمكن تقسيم مقاومية المواد.

٣- اشرح كيف تؤثر الذرات المذابة والعيوب الذرية الاخرى على المقاومية.

٤- تكلم عن اهم تطبيقات المقاومة الكهربائية في فحص المواد.

٥- ماهي ميزات طريقة المقاومية في متابعة الترسب وقياس الكسر الحجمي على الطرائق التقليدية في القياس (طرائق المجهر سواءً الضوئي أو الإلكتروني).

٦- ماهي أهم العوامل التي تؤثر على قيمة المقاومية للمادة مع ذكر أمثلة على ذلك .

٧- ماذا تعرف عن مقاييس الانفعال وماهي أهم وظائفها.

٨- ماهي الشروط الواجب توفرها في سلك مادة مقياس الانفعال.

٩- أثبت ان الاحتمالية في ان يحتل الكترون ما مستوى طاقة E هي (أ) قليلة جداً إذا كانت $E >> E_F$ ، (ب) 0.5 إذا كانت $E=E_F$ و (جـ) حوالي واحد اذا كانت $E << E_F$

١٠- احسب زمن تصادم استطارة الإلكترون في الفضة اذا كانت مقاوميتها عند درجة حرارة الغرفة هي $1.6 \times 10^{-8}\ \Omega m$.

# الفصل العاشـــــر

# الفحوص الميكانيكية Mechanical Testing

## ١٠-١ المقدمة:

لابد ان تمتلك المادة خواصاً مناسبة لكي تكون ذات قيمة عند المهندس وخصوصاً الخواص الميكانيكية. وتشتمل الخواص الميكانيكية على الصلادة (hard-ness) والمقاومة (Strength) والمتانة (toughness) والزحف (creep) والكلال (fa-tigue) والثني (bending) والتقبب (Cupping) واللي (torsion) . وتتباين قيم هذه الخواص بشكل كبير من مادة الى أخرى اعتماداً على بنية المادة وتكوينها الكيماوي.

وسيتم التركيز في هذا الفصل على المواد المعدنية نظراً لاهميتها من بين المواد الهندسية في الصناعة .

## ١٠-٢ الصلادة واختبار الصلادة Hardness and Hardness Test

ماهي الصلادة:

ربما تكون الصلادة هي الخاصية الاهم للمعادن. ومن الصعوبة تعريفها تعريفاً دقيقاً ولكن يمكن ان تعرف والى مدى جيد، بأنها قياس لمقاومة التشكيل (a meas-ure of resistance to deformation) او أنها قياس لمقاومة التغلغل (Penetration) . ان كلا التعريفين يشيران الى مقاومة سطح المعدن اوالمادة للضرر او الانبعاج او التمزق او التدهور بأي شكل من الأشكال نتيجة لقوة او ضغط يسلط عليه.

لذلك ومن أجل ابتداع وسيلة لقياس الصلاده ، يجب ان تصنع ماكنة (جهاز) فيه باعج (Penetrator) والذي يحاول ان يبعج او يتغلغل او يخدش السطح. يجب اذن

استخدام قوة او حمل يسلط على الباعج . ومن ثم فإن مقاس او حجم (size) الاثر الناتج على سطح النموذج سيكون مقياساً لصلادة المادة.

العلاقة بين الصلادة وبقية الخواص:

ان خاصية الصلادة مهمة في حقل هندسة المواد لأنها ترتبط بعدة خواص للمادة الهندسية وخاصة المقاومة (strength) والهشاشية (brittleness) والمطيلية (ductility) فبواسطة الصلادة يمكن بصورة غير مباشرة قياس المقاومه و الهشاشيه والمطيليه للمادة المعدنية.

فالصلادة اذن تشبه قائمة مشتريات البقاله للعائلة . فمن حجم القائمة يمكنك تقدير حجم العائلة. ومن نوعية مواد القائمة يمكن تخمين المستوى الاقتصادي للعائلة وعاداتها الاجتماعية. وبالمثل فإن الصلادة تعكس العديد من خواص وسمات عائلة المادة. كالمقاومة والهشاشية والمطيلية وقابلية التشغيل (machin-ability) وقابلية التشكيل (formability) والمتانة (toughness) والميل للتشقق (cracking tendency) .

**طرائق قياس الصلادة:**

هناك العديد من طرائق قياس الصلادة والعديد من أجهزة قياس الصلادة . كل طريقة لها ميزاتها ومثالبها نسبة للطرائق الاخرى. اذن فتحديد طريقة الفحص والجهاز الذي يجب ان يشترى يعتمد على التطبيق المحدد.

ادناه اهم طرائق اختبار الصلادة:

١- صلادة برنيل Brinell hardness

٢- صلادة فيكرز Vicker`s hardness

٣- صلادة نوب المجهرية Knoop microhardness .

٤- صلادة روكويل Rockwell hardness

٥- صلادة شور للارتداد النسبي shore scleroscope hardness

٦- صلادة موز (نسبة لصلادة عشرة احجار سيراميكية مختلفة الصلادة)
Mohs hardness

٧- صلادة سونودر (تردد الرنين) Sonodur hardness

٨- صلادة المبرد (الصلادة بالخدش) File hardness

٩- صلادة روكويل السطحية Rockwell superficial hardness

وسيتم التطرق الى اهم طرائق اختبار الصلادة:

**١-٢-١٠ اختبار برينيل Brinell Test :**

تشتمل اداة الغرز في اختبار برينيل (الشكل 1-10 ) على كره فولاذية مصلده مثبته في حامل مناسب، تسلط على سطح مهيأ من قطعة الاختبار باستعمال حمل مناسب يحافظ على تسليطه لفترة خمس عشرة ثانية. ويقاس قطر الاثر الدائري المتخلف عند السطح بعد ازالة الحمل باتجاهين عند زوايا قائمة باستخدام مجهر مدرج واطئ التكبير، ثم يؤخذ معدل القطر (متوسط القطر).

ويمكن حساب صلادة برينيل (HB) من المعادلة التالية:

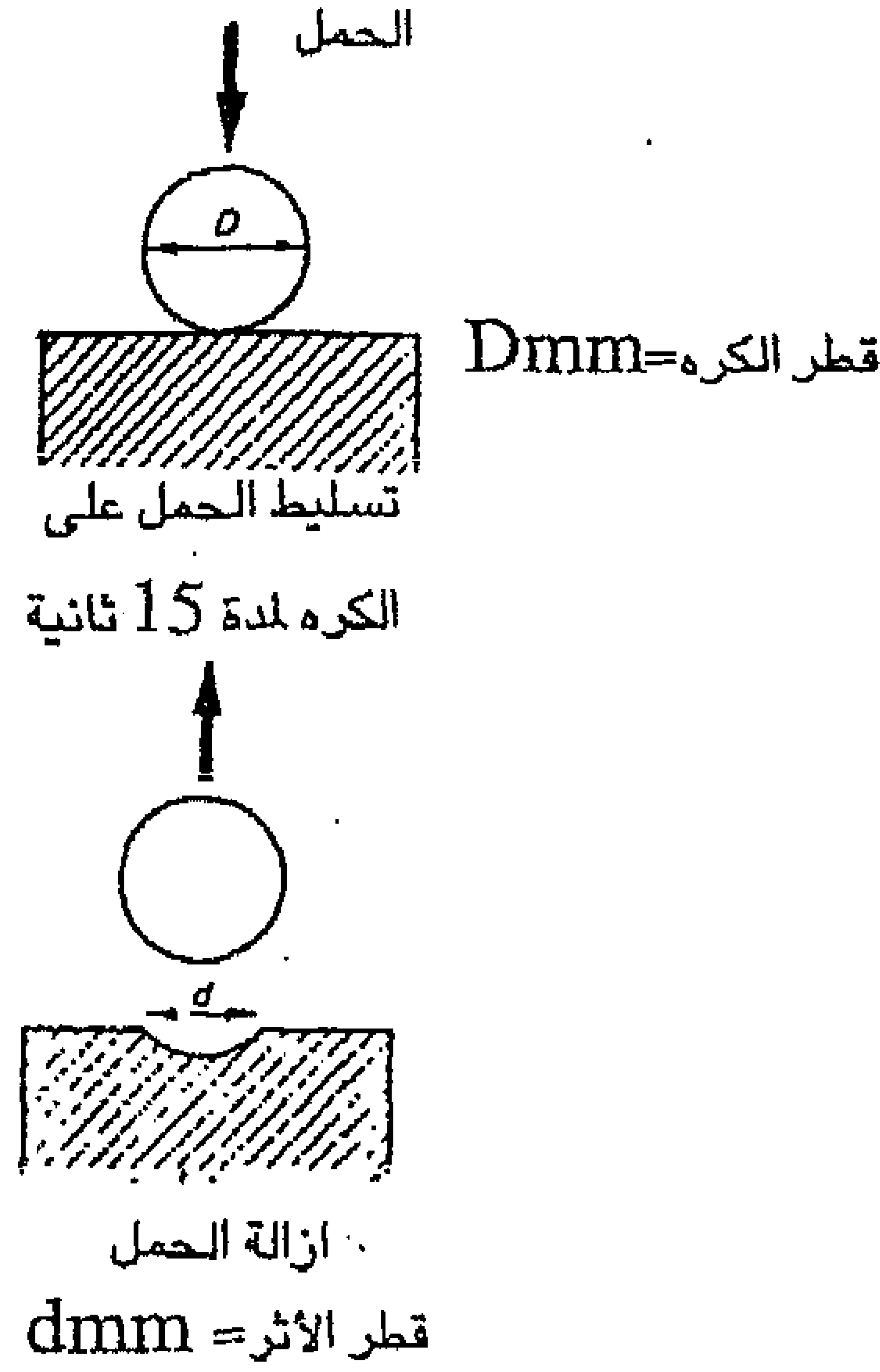
$$\text{صلادة برينيل} = \frac{\text{الحمل } (kgf)}{\text{مساحة السطح المنحني من الاثر } (mm^2)}$$

اي ان

$$HB = \frac{F(kgf)}{\frac{1}{2}\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]mm^2} \qquad \text{.............} (1\text{-}10)$$

الشكل (10-1) اختبار

صلادة برينيل.




حيث أن

D = قطر الكرة (ملم) و d = قطر الاثر الدائري (ملم) و F = الحمل، الذي تكون وحداته في اختبار الصلاده كغم . قوة (kgf) حيث ان :

9.8N=1kgf (نيوتن).

ولتجنب الحسابات الشاقة يمكن ايجاد صلادة برينيل من جداول معده لهذا الغرض تربط الصلادة بقطر الاثر . ويخص كل جدول. حمل وقطر كره معينين وعند اجراء اختبار الصلادة لابد من مواجهة بعض المتطلبات. اولها ان عمق الاثر يجب الايكون كبيراً للغاية نسبة لسمك قطعة الاختبار وإلا فإن المنضده الحاملة لقطعة الاختبار ستتحمل الحمل وليس قطعة الاختبار ذاتها. ويجب الايقل سمك قطعة الاختبار للمواد الليّنه عن 15 ضعف من عمق الاثر بينما لايقل عن 7 أضعاف من عمق الاثر للمواد الصلدة.

ان كرة بقطر 1 و 2 و 5 و 10mm متوفرة ، ولابد من اختيار قطر كره يناسب

سمك قطعة الاختبار مع الاخذ بالاعتبار بأنه يمكن استخدام الكره الاكبر حجماً. وربما تتقرر دقة النتائج على قطر الكره الملائم .ويجب اختيار حمل يعطي اثراً بحجم معقول.

لقد تم معايرة النسبة $\frac{F}{D^2}$ لعدد من المواد المختلفة حيث أن (F) هي الحمل (kgf) و D هو القطر (mm)،لغرض الحصول على قيم معقولة يمكن مقارنتها. وقد تم اخذ اربعة قيم عياريه للنسبه $\frac{F}{D^2}$ هي 1 و 5 و 10 و 30 وكما مبين في الجدول (1-10) .

الجدول (1-10) القيم العيارية لـ $\frac{F}{D^2}$ (اختبار برينيل):

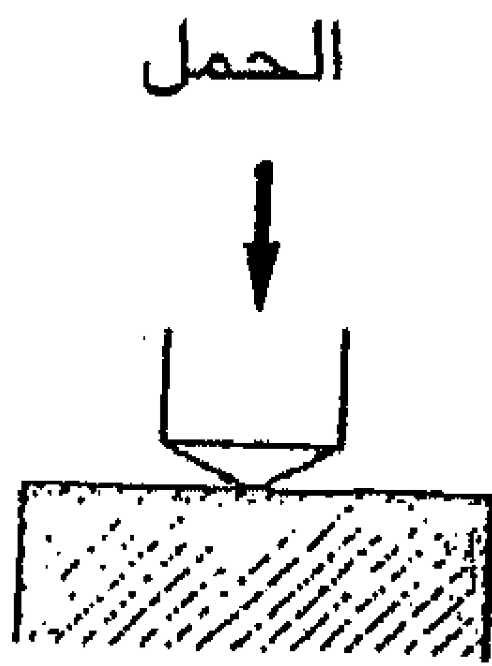
| قطر الكرة D (mm) | الحمل (kgf) كغم . قوة | | | |
|---|---|---|---|---|
| | الفولاذ وحديد الزهر $\frac{F}{D^2}=30$ | النحاس وسبائك النحاس وسبائك الالمنيوم $\frac{F}{D^2}=10$ | الألمنيوم $\frac{F}{D^2}=5$ | القصدير والرصاص وسبائكهما $\frac{F}{D^2}=1$ |
| 1 | 30 kgf | 10 kgf | 5 kgf | 1 kgf |
| 2 | 120 kgf | 40 kgf | 20 kgf | 4 kgf |
| 5 | 750 kgf | 250 kgf | 125 kgf | 25 kgf |
| 10 | 3000 kgf | 1000 kgf | 500 kgf | 100 kgf |

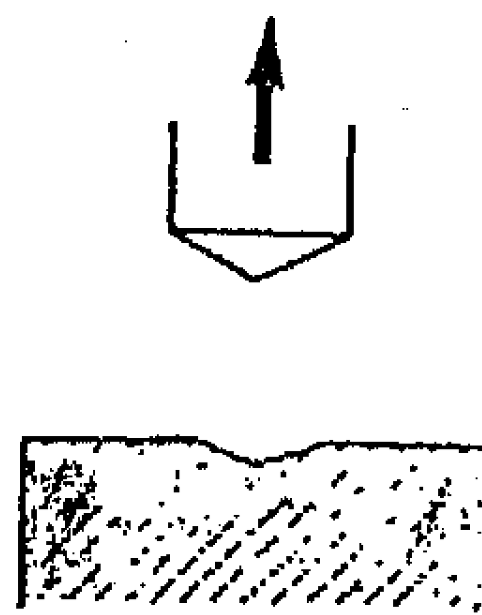
ويلحق برمز صلادة برينيل عدد يبين قطر الكره المستخدمة والحمل المسلط. ويظهر من 248HB 10/3000 بأن صلادة برينيل هي 248 تم الحصول عليها باستخدام كره قطرها10mm وحمل مسلط مقداره 3000kgf .

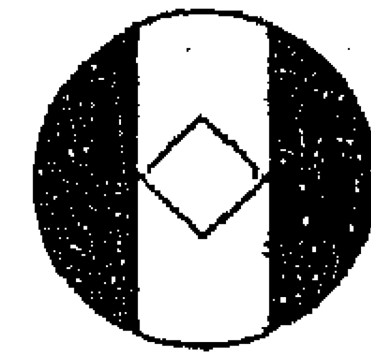
ولايعول على اختبار برينيل في اختبار المواد التي تبلغ صلادتها اعلى من 450 وذلك لاحتمال تشوه اداة الغرز (الكره المصنوعة من الفولاذ المصلّد Hardened steel). ويكوّن اختبار برينيل أثراً كبيراً نسبياً، يكون مرغوباً فيه عندما يُراد الحصول على متوسط الصلادة لمادةٍ غير متجانسة (Heterogenous material) كحديد الزهر الرمادي والنحاس الاصفر (brass) ذو الطورين ($\alpha+\beta$) . مع ان الاثر الكبير قد يعترض عليه.

**١٠-٢-٢ اختبار فيكرز Vickers Test :**

أبعد اختبار صلادة فيكرز (الشكل 10-2) الحاجة الى تحديد نسبة $\frac{F}{D^2}$ الصحيحة وذلك باستخدام اداة غرز موشوريه ماسيه مربعة القاعدة (square-based diamond pyramid indenter) لاتتشوه بسهولة وتعطي آثار متشابهة هندسياً تحت احمال مختلفة. لذا فإن دقة النتائج لن تتباين مع عمق الاثر. مع ذلك لابد من ملاحظة العلاقة بين عمق الاثر وسمك قطعة الاختبار.





**حمل مسلط علي موشور ماسي 136° مربع القاعدة لمدة 15 ثانية.**

**ازالة الحمل.**

**يقاس قطر الاثر بوساطة شق طولي متغير مثبت في العدسة العينيه.**

**الشكل (10-2) اختبار فيكرز.**

وتسلط اداة الغرز الماسية التي تكون بهيئة موشور قائم ذي قاعدة مربعة وزاوية $136^{\circ}$ مابين الاوجه المتقابلة على السطح المهيأ من مادة الاختبار تحت حمل معين. وينتج الماس اثراً مربعاً ويؤخذ متوسط طولي القطرين (Diagonal le gth) اللذين يقاسان باستخدام مجهر ذا شق طولي متغير مثبت في العدسة العينيه (eye- piece) . يتم تنظيم عرض الشق بحيث تتطابق حافاته مع زوايا الأثر . ويتم الحصول على طول الضلع القطري من دوران العداد المعشق بحركة الشق الطولي. ثم تحوّل القراءة العينيه الى رقم صلادة فيكرز (HV) بالرجوع الى او بتطبيق العلاقة الناتجة من تعريف صلادة فيكرز وكالآتي:

$$\text{صلادة فيكرز (HV)} = \frac{\text{الحمل (kgf)}}{\text{مساحة سطح الاثر } (mm^2)}$$

$$HV = \frac{F}{\dfrac{d^2}{2\sin\frac{1}{2}(136^{\circ})}} = \frac{2F\sin 68^{\circ}}{d^2}$$

$$HV = 1.854\ \frac{F}{d^2} \qquad \text{.........} \ (2\text{-}10)$$

حيث تمثل

F الحمل kgf.

d معدل قطر الاثر mm .

ويمكن استخدام واحد من الاحمال 2.5 و 5 و 10 و 20 و 30 و 50 و 100 kgf . اعتماداً على صلادة وسمك الماده المراد اختبارها . ويتم التحكم بمعدل وزمن التحميل (15sec) الياً بوساطة مكبس يعمل في نبيطه زيتيه (oil dashpot) ويلحق

الرمز HV بعدد يبين الحمل المستخدم في الاختبار ، وهكذا فإن 650 HV/30 يدل على ان صلادة فيكرز هي 650 تم الحصول عليها عند حمل مقداره 30kgf .

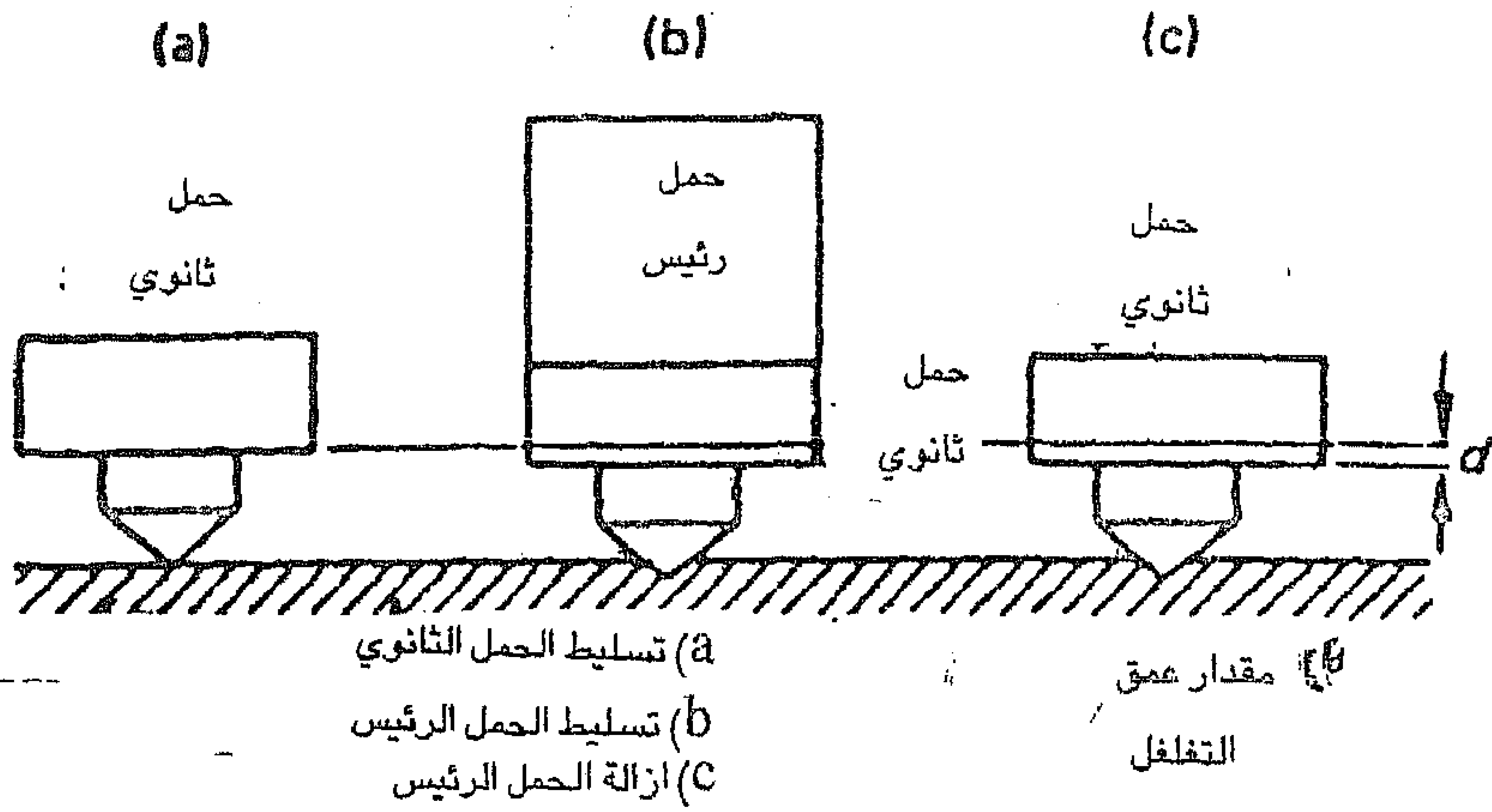
وبما ان الاثر الناتج بوساطة الماس أصغر بكثير من الاثر الناتج عن اختبار برينيل، لذا تحتاج مادة الاختبار الى صقل انعم عند اختبارها بصلادة فيكرز. وهذا يعني ان اختبار فيكرز اكثر ملاءمة لاختبار الاجزاء المصقولة (المنجزة) مقارنة باختبار برينيل. يزودنا اختبار فيكرز بمقياس صلادة يلائم المواد اللينه جداً الى الصلدة جداً.

ان صلادة فيكرز وبرينيل متساوية تقريباً ولغاية رقم الصلادة 300 لكنه عند القيم الاعلى فإن نتائج برينيل تكون أقل لتشوه اداة الغرز. وكما بيّنا آنفاً لايعول على رقم صلادة برينيل عند اعلى من 450 .ويجب ان لاتقل صلادة الكره الفولاذية المصلدة والمستخدمة في اختبار برينيل عن 850 صلادة فيكرز (HV) .

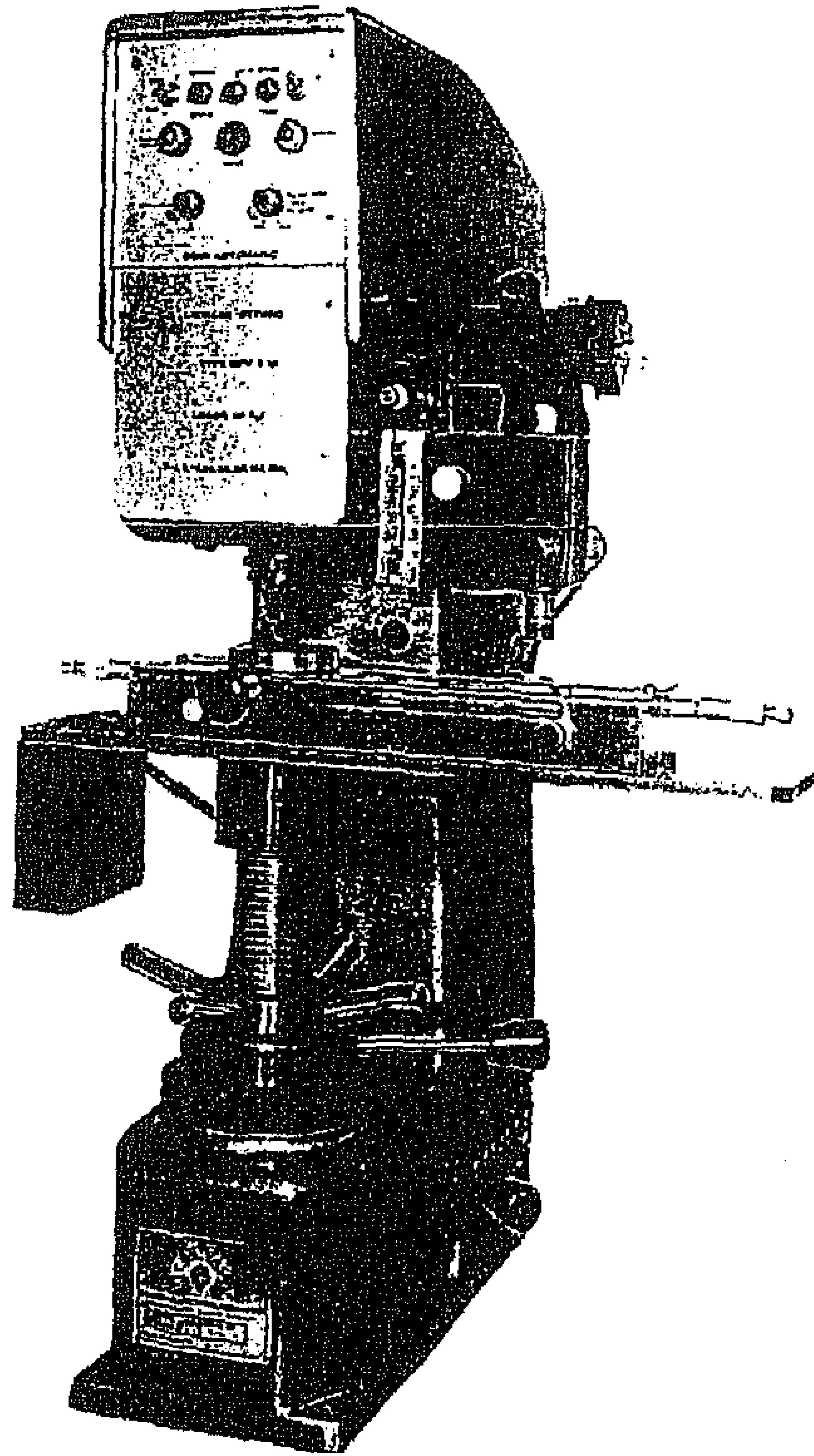
### ٣-٢-١٠ اختبار روكويل Rockwell Test :

يقاس عمق الاثر في اختبار روكويل (الشكل 10-3) بجهاز قياس خاص. ويظهر ذلك على القرص المدرج (Dial) كقيمه صلاده (الشكل 10-4) ولايشتمل هذا الاختبار على قياسات لاحقة للأثر.

تثبت قطعة الاختبار على منضدة الجهاز ويجعل سطح الجزء المراد اختباره بتماس مع اداة الغرز تحت حمل ثانوي (minor - Load) مقداره 10kgf للتخلص من الارتخاء (Slack) في المنظومة ثم يصفّر مؤشر القرص المدرج ويسلط الحمل الرئيس (major load) . وعندما تستقر قراءة مؤشر القرص المدرج يزال الحمل الرئيسي. وتبقى قطعة الاختبار تحت تأثير الحمل الثانوي بينما تقرأ قيمة الصلادة مباشرة على مؤشر القرص المدرّج. وتتوفر تسعة مقاييس مدرجة للصلادة (تشتمل على A الى K ولكن المقياسين B و C هما الاكثر شيوعاً في الاستعمال وتفاصيلهما مبينه في الجدول (10-2) .




الشكل (10-3) اختبار صلادة روكويل (Rockwell).



الشكل (10-4)جهاز اختبار صلادة روكويل.

يقسم القرص المدرج الى 100 تدريجة، كل منها يمثل نقطة واحده على مقياس الصلادة المدرج ويرفق الرمز HR بحرف (مثل B أو C ) يبين مقياس الصلادة المستخدم.

جدول (10-2) مقياس اختبار روكويل للصلادة

| المقياس | ادا ة الغرز | الحمل kgf | | |
|---|---|---|---|---|
| | | الثانوي | الرئيسي | المجموع |
| B | كره فولاذية قطرها 1.6mm | 10 | 90 | 100 |
| C | مخروط ماسي $120^{\circ}$ | 10 | 140 | 150 |

إن مقياس صلادة روكويل المدرج غير تناسبي ، فعند قيم الصلادة المنخفضة فإن زيادة بمقدار واحد في قيمة صلادة روكويل (HRC)تقابلها زيادة مقدارها حوالي (5) في صلادة فيكرز (HV) بينما عند قيم الصلادة العالية فإن زيادة بمقدار واحد في صلادة روكويل (HRC) ربما يقابلها زيادة مقدارها (40) في صلادة فيكرز. وهكذا فإن مقياس روكويل ليس بدقة مقياس فيكرز في تمييز الاختلاف البسيط في صلادة المواد الصلده. ومع ذلك فإنه يناسب الاختبارات النمطية السريعة للمواد تامة الصنع (المنجزه) . ويستخدم مقياس (C) غالباً للفولاذ المصلد بينما يستعمل المقياس (B) للفولاذ غير المصلد والسبائك اللاحديدية الصلدة.

### ٤-٢-١٠ اختبار صلادة روكويل السطحيه:

يتشابه اساس هذا الفحص مع طريقة روكويل المألوفة ولكن باستخدام وزن اقل لذايمكن فحص عينات ارق.ان نوع مادة الغرز المستخدمة ومقدار الحمل التمهيدي والإضافي ومجموع الاحمال معطاة في الجدول(10-3).

يسبق الرمز HR قيمة الصلادة ويرفق بالحمل الكلي kgf وحرفاً يبين مقياس الصلادة السطحية الخاص المستعمل. فالقيمة التالية 70HR30N تظهر ان صلادة روكويل 70 أجريت على مقياس 30N (أداة الغرز مصنوعة من ماس مخروطي الشكل) وبحمل 30kgf. يبين الجدول (10-4) مديات صلادة بعض المواد المعدنية الشائعة الاستخدام

**جدول (10-3) مقياس اختبار صلادة روكويل السطحي.**

| المقياس | اداة الغرز | الحمل (kgf) | | |
|---|---|---|---|---|
| | | الابتدائي | الإضافي | المجموع |
| 15N | مخروط ماسي $120^{\circ}$ | 3 | 12 | 15 |
| 30N | | 3 | 27 | 30 |
| 45N | | 3 | 42 | 45 |
| 15T | كرة فولاذية قطرها 1.6mm | 3 | 12 | 15 |
| 30T | | 3 | 27 | 30 |
| 45T | | 3 | 42 | 45 |

**جدول (10-4) المديات النموذجية لصلادة بعض المواد المعدنية الشائعة**

| المادة | الصلادة | المادة | الصلادة |
|---|---|---|---|
| براص (كمصبوبة) | صلادة برينيل 60-100 | حديد زهر ابيض | صلادة فيكرز 420-450 |
| فولاذ منخفض الكاربون (مدحو على الساخن) | صلادة برينيل 120-140 | | صلادة روكويل 42-44 |
| | | سطح فولاذ منترد | صلادة فيكرز 1100-1000 |
| حديد زهر رمادي | صلادة برينيل 150-240 | | |
| فولاذ متوسط الكاربون | صلادة برينيل 200-250 | | |

كما يبين الجدول (10-5) مقارنة تقريبية لمقاييس الصلادة الخاصة بالمواد اللينه (كالمعادن اللاحديدية وسبائكها الرصاص والألمنيوم والنحاس..) والمواد الصلده (كالفولاذ والتنكستن وغيرها).

**جدول (10-5) مقارنة تقريبية لمقاييس الصلادة الثلاثة:**

| مواد لاحديدية | | | فولاذ | | |
|---|---|---|---|---|---|
| صلادة فيكرز | صلادة برينيل | صلادة روكويل(B) | صلادة فيكرز | صلادة برينيل | صلادة روكويل(B) |
| 20 | 19 | - | 150 | 143 | 80 |
| 40 | 38 | - | 170 | 162 | 87 |
| 60 | 57 | - | 190 | 181 | 92 |
| 80 | 76 | 32 | 200 | 190 | 94 |
| 100 | 95 | 53 | 210 | 200 | 96 |
| 120 | 114 | 66 | 220 | 209 | 98 |
| 150 | 143 | 80 | 230 | 219 | 99 |

**يتبع جدول (5-10):**

| فولاذ مصلّد | | |
|---|---|---|
| صلادة فيكرز | صلادة برينيل | صلادة روكويل(C) |
| 230 | 219 | 20 |
| 250 | 238 | 24 |
| 300 | 285 | 31 |
| 350 | 333 | 36 |
| 400 | 380 | 41 |
| 450 | 428 | 44 |
| 500 | - | 47 |
| 600 | - | 54 |
| 700 | - | 58 |
| 800 | - | 62 |
| 900 | - | 65 |
| 1050 | - | 68 |
| 1170 | - | 70 |

**٥-٢-١٠ طريقة نوب لاختبار الصلادة:**

يستخدم حمل (Load) صغير في اختبار صلادة نوب حيث يصل الى (25g) للمساحات الصغيرة جداً. ان اغلب أجهزة الصلادة المجهرية (microhardness ma-chines) مزودة بتسهيلات فحص صلادة نوب اضافة الى صلادة فيكرز.

ان الإداة المتغلغلة في هذا الاختبار هي هرم ذو مقطع معيني مختلف المحاور (el-ongated pyramid)فيه نسبة طول المحور الكبير الى الصغير تساوي 7الى 1. ان اسلوب اختبار صلادة نوب مشابهة لأسلوب اختبار صلادة فيكرز. يمكن أن تقرأ قيمة صلادة نوب مباشرة على شاشة رقميه موجوده في الجهاز.

أما وحدات الصلادة هنا فدعى وحدات نوب (Knoopunits).

اما أهم مميزات اختبار صلادة نوب على اختباري صلادة فيكرز وبرينيل فهي:

١- يعتبر بصوره عامه اختبار لاأتلافي.

٢- يمكن استخدامه لقياس المواد الرقيقه جداً.

٣- يمكن استخدامه لاختبار منطقة سطحية صغيرة جداً.

ويجب في هذا الاختبار ان يكون سطح النموذج ناعم ومسطح ونظيف وأفقي.

**٦-٢-١٠ طريقة اختبار صلادة صونودر Sonodur hardness test:**

عند اختبار صلادة الصونودر، يضغط قضيب مقبّض مغناطيسي مدبب ماسي (diamond- tipped magnetostrictive rod) ذو قطر مقداره(0.75mm) ضد النموذج المراد فحصه. ويستخدم ملف كهربائي (electrical coil) لذبذبة القضيب والتردد الاعظم الذي يتذبذب به القضيب يتم تحديده في الجزء الالكتروني في الجهاز. يدعى هذا التردد بتردد الرنين (resonant frequency). تمتلك الماده الاصلد تردد رنين اعلى.

تحوّل قيمة تردد الرنين الى رقم صلاده. يقرأ جهاز صونودر، الصلادة بوحدات صلادة برنيل (BHN).

**ميّزات اختبار صلادة صونودر:**

جهاز الصونودر صغير ويمكن حمله بسهولة. يعطي الاختبار نتائج سريعة جداً ولايتلف النموذج. طريقة اختبار صلادة صونودر احدث من بقية طرائق اختبار الصلادة الاخرى وتعتبر مضبوطة جداً.

## ٣-١٠ مقاومة الشد Tensile Strength

### ١-٣-١٠ الاجهاد والانفعال Stress and Strain

قبل الخوض في تفاصيل الاجهاد والانفعال لابد من الرجوع الى بعض خواص المادة. فكتلة الجسم هي كمية المادة التي يحتويها. ووحدة SI للكتله هي (kg). وزن الجسم هي القوة التي يسلطها على أي شيء يرتكز عليه.

القوة = الكتلة × التعجيل ............... (3-10)

ووحدة SI للقوة هي النيوتن (N) ، وهي القوة التي عند تسليطها على جسم كتلته 1kg تعطيه تعجيلاً مقداره $1 m/sec^2$ . وقوة الكيلو غرام هي القوة التي عند تسليطها على جسم له كتلة 1kg تعطيه تعجيلاً مقداره $9.8\ m/sec^2$ .

عند تسليط قوة او حمل على ماده، فإنها تنتج اجهاداً في الماده. والاجهاد المؤثر على مادة هوالقوة المسلطة لوحدة المساحة.

$$\text{الاجهاد} = \frac{\text{القوه}}{\text{المساحة}} \quad \text{.......(4-10)}$$

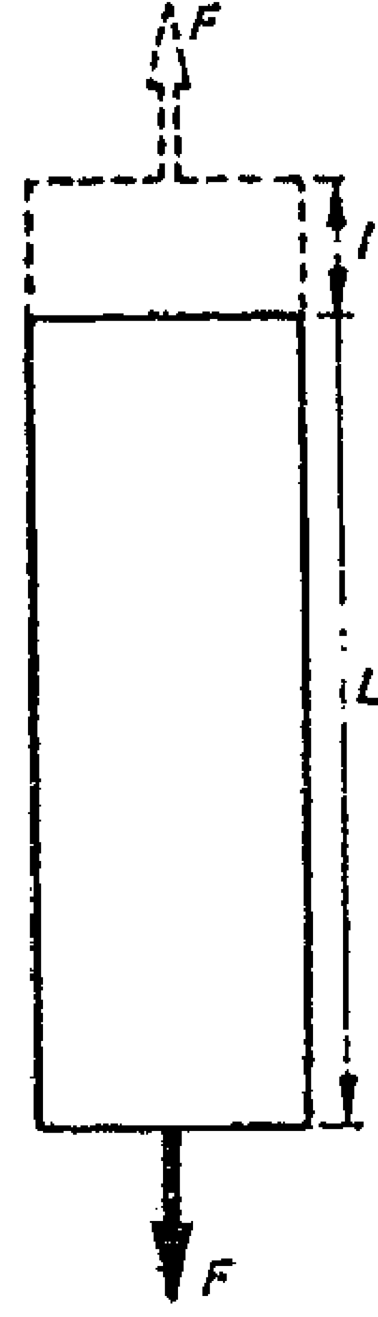
وحدة الاجهاد هي $N/m^2$ . ومن الملائم قياس الاجهاد بوحدات $N/mm^2$ عند الاختبار الميكانيكي.

$10^{-3}m=1mm$ ولذلك فإن $10^{-6}m^2=1mm^2$ كما أن

$$1MN/m^2 = 10^6N/m^2 = 1N/mm^2$$

وقد تكون الاجهادات في طبيعتها شدية (tensile) اوانضغاطية (compressive) او قصية (shear). يبين الشكل (10-5) كتله معدنية في حالة شد، حيث تمثل "F" قوة الشد التي تزيد طول الكتله وتقلل من مقطعها العرضي. فإذا كانت مساحة المقطع العرضي "A" لكتلة المعدن فإن اجهادها الشدي يساوي $\frac{F}{A}$.

ويسمى التغيير في الابعاد الناتج عن الاجهاد بالانفعال (Strain). والإنفعال في الشد (اوالضغط) هو نسبة التغيير في الطول الى الطول الأصلي.




الشكل (10–5) قطعة معدنية تحت الشد .

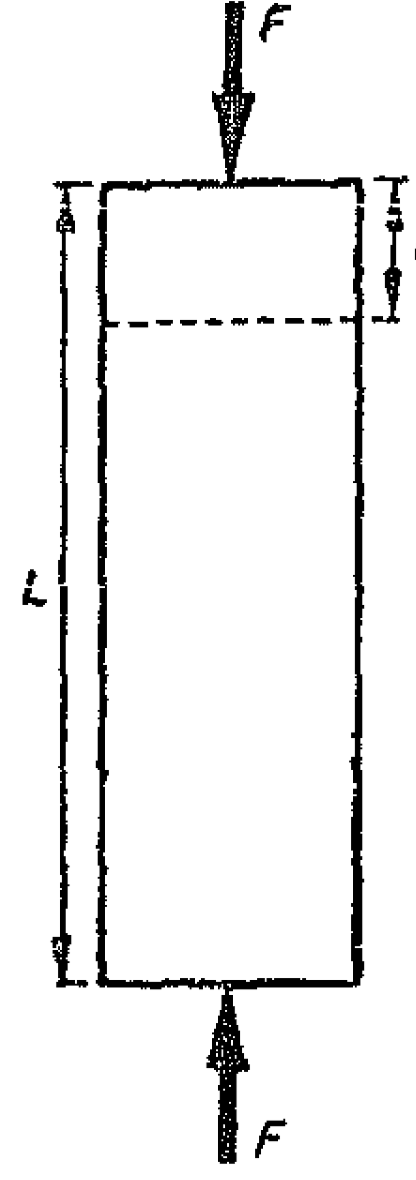
وهكذا ففي الشكل (10-5) .

$$\text{انفعال الشد} = \frac{\text{الزيادة في الطول}}{\text{الطول الأصلي}} = \frac{l}{L} \qquad (5\text{-}10)\ldots\ldots$$

وبما ان الانفعال نسبة فهو اذن رقم مجرد من الوحدات ولابد ان نعبر عن التغيير في الطول والطول الاصلي بنفس الوحدات . وقد يعبّر عن الانفعال ايضاً بالنسبه المئوية.

في الشكل (10-6) تضغط القوة "F" المعدن ، لذلك تقلل طوله وتزيد من مقطعه العرضي ، وفي هذه الحالة فإن الاجهاد الانضغاطي يساوي $\frac{F}{A}$ .

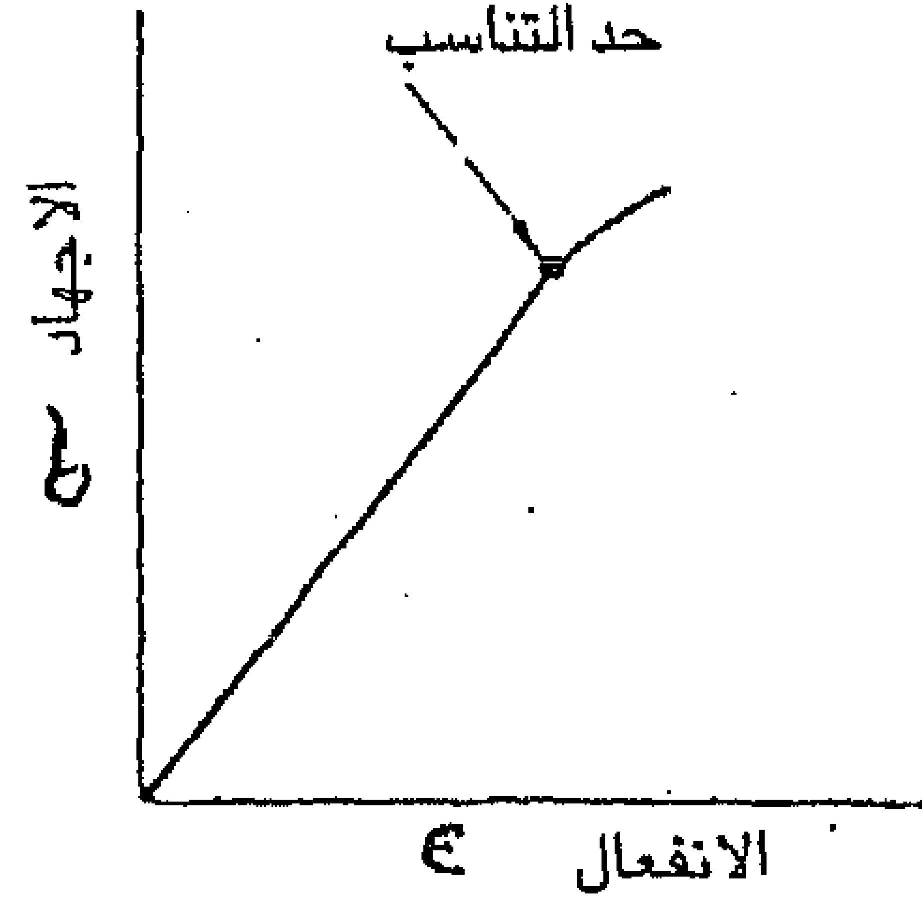
$$\text{انفعال الانضغاط} = \frac{\text{النقصان في الطول}}{\text{الطول الاصلي}} = \frac{l}{L} \qquad (6\text{-}10)\ldots\ldots$$




الشكل (10-6) قطعة معدنية تحت الانضغاط.

وعند السلوك المرن( elastic behaviour) يُزال الانفعال الناتج في المادة المجهدة حالما يُزال الاجهاد، لذلك تعود المادة الى ابعادها الاصلية. و تبدي بعض المواد المعدنية خواصاً مرنه حتى عند اجهادات عالية نسبياً بينماتبدي مواد معدنية اخرى مرونة قليلة. وعند تحميل اي مادة مرنه تدريجياً اثناء الشد، فالإنفعال المرن الناتج يتناسب تناسباً طردياً مع الاجهاد المسبب له. وتعرف هذه العلاقة بقانون هوك (Hooke`s Law). ويكون الرسم البياني للإجهاد/ الانفعال (الشكل10-7) عباره عن خط مستقيم يمر بنقطة الصفر. وميل هذا الخط المستقيم (الاجهاد/ الانفعال) ثابتاً للمعدن المعين. ويعرف هذا الثابت بمعيار يونك (Young`s modulus) او معيار المرونة (modulus of elasticity) ويرمز له بالرمز E لذلك فإن:

$$\text{معيار المرونة } (E) = \frac{\text{الاجهاد}}{\text{الانفعال}} \qquad \text{..........(7-10)}$$




**الشكل (10-7) منحنى الاجهاد / الانفعال يبين حد التناسب.**

وبما أن الانفعال مقدار مجرد من الوحدات (Dimensionless) فإن لمعامل المرونة نفس وحدات الاجهاد. وتتحكم قيمة "E" بطبيعة الفولاذ وتبلغ حوالي $2x10^5$ N/mm$^2$ للفولاذ. ولاتتأثر كثيراً بالمعاملة الحرارية وتنخفض مع زيادة درجة الحراره. وكلما زادت قيمة E كلما كانت المادة اكثر مرونه.

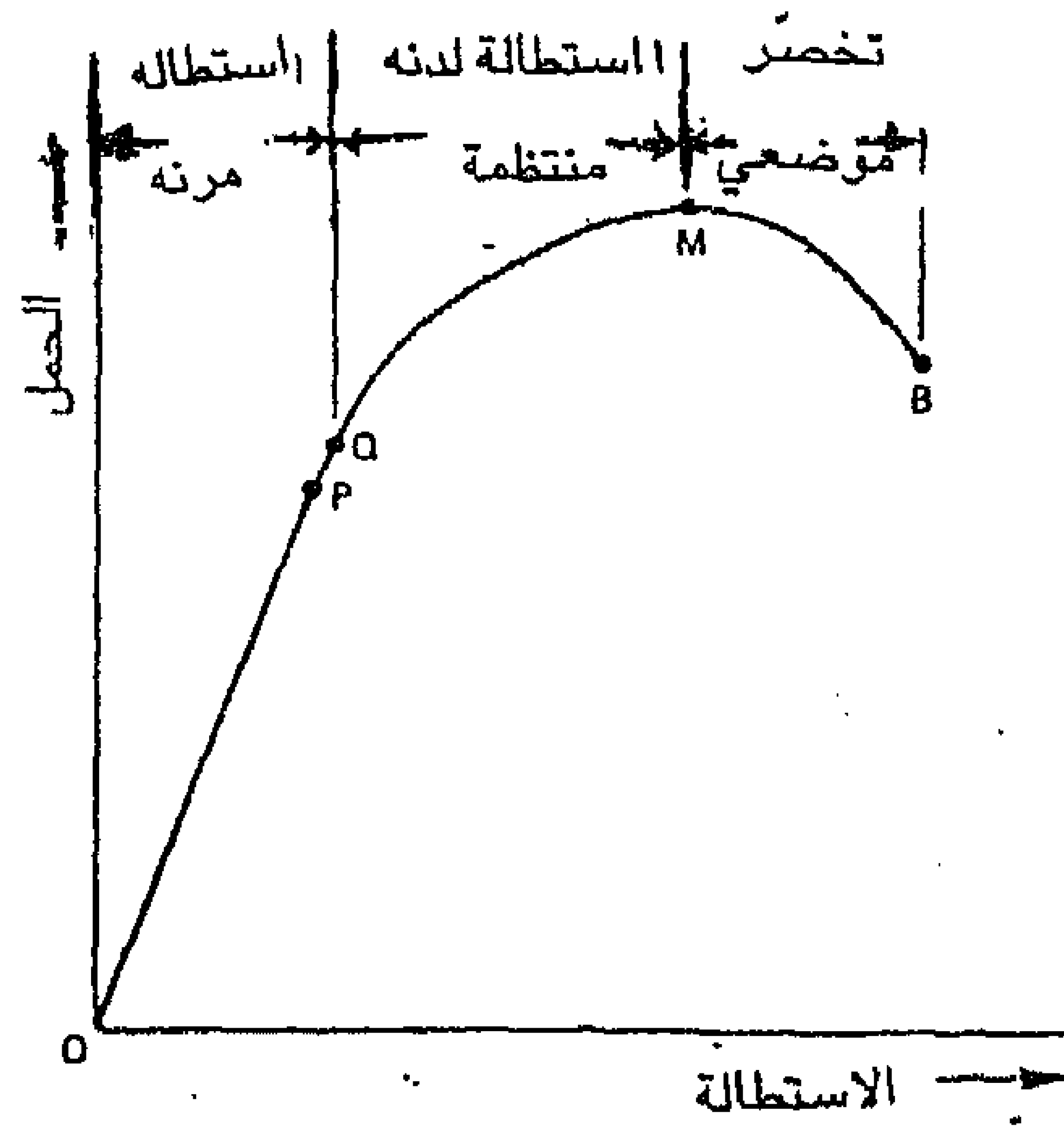
ويبين الشكل(8a-10) جزءاً مثبتاً من أحد اطرافه وقد اجهد طرفه بقوه عموديه متجهه نحو الاسفل. وتميل القوه (F) لإحداث فشل وكما مبين في الشكل (8b-10) وتدعى بالقوه القصيه (shearing force) وسيحدث كسر على طول المستوى الموازي للقوه المسلطه، لذلك فإن الجزء الواقع على يمين المستوى ينزلق الى الأسفل نسبة الى الجزء الواقع الى اليسار. وميزة التحميل القصي واجهاد القص الناتج ان اتجاههما يوازي مساحة المقطع العرضي المقاومة للكسر.

$$\text{اجهاد القص} = \frac{\text{قوة القص}}{\text{مساحة المقطع العرضي}} = \frac{F}{A} \qquad \text{.......(8-10)}$$

### ٢-٣-١٠ الرسوم البيانية للحمل – الاستطالة:

إذا سُلط حمل شدي يتزايد تدريجياً على قطعة اختبار ، وقيست الاستطالة باستمرار، يمكن رسم شكلاً بيانياً بين الحمل والاستطالة، ويمكن الحصول على عدة انواع من الرسوم البيانيه (كما سيأتي لاحقاً) اعتماداً على طبيعة المعدن وحالته.

ويبين الشكل (9-10) رسماً بيانياً نموذجياً للحمل– الاستطالة يتلائم مع عدة مواد معدنيةمجهدةشدياً. ففي البدايه يزداد طول قطعة الاختبار ويتناسب طردياً مع زيادة الحمل المسلط وعلى طول (OP) وهكذا يتضح قانون هوك. ولايؤخذ بقانون هوك بعد النقطة (P) التي تُعرف بحد التناسب (Proportionality Limit). بصوره عامة هناك نقطة أخرى (Q) التي تحتفظ المادة بمرونتها عندها، اي ان قطعة الاختبار تعود الى ابعادها الاصلية عند ازالة الحمل. وتعرف نقطة "Q" بأنها حد المرونة (elastic limit) للماده. والنقطتان متطابقتان اعتماداً على حساسية (sen-sitivity) الاختبار.




**الشكل (9-10) منحنى الحمل – الاستطالة الخاص بعدة مواد معدنية.**

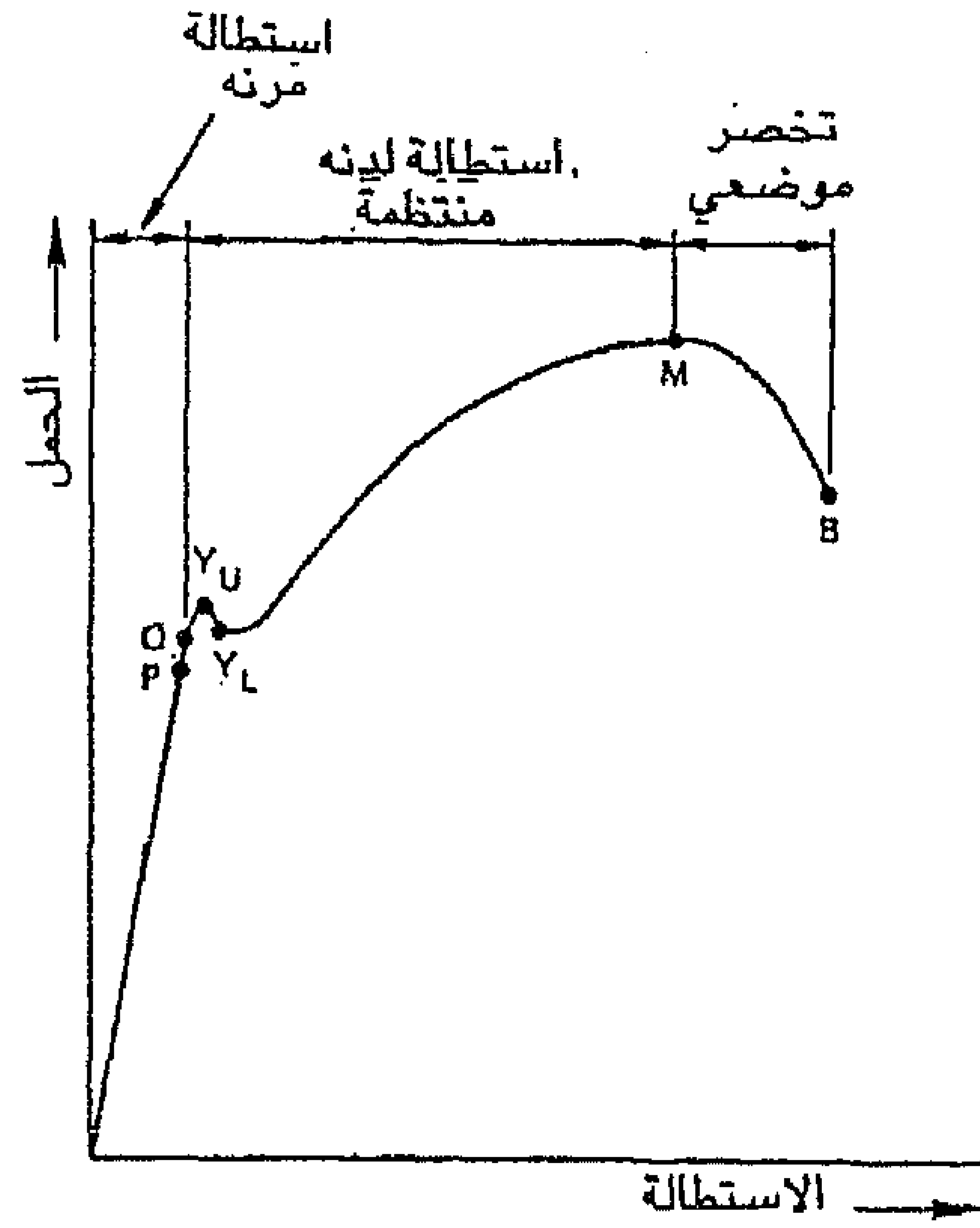
واستطالة قطعة الاختبار قليله جداً لحد نقطة (Q) ويحتاج قياسها الى استخدام جهاز حساس يسمى مقياس الاستطالة (extensometer). وتكون الاستطالة بعد نقطة (Q) دائمية (لاتزول الاستطالة بعد ازالة الحمل) ويسمى الانفعال غير المرن الدائمي بالانفعال اللدن (plastic strain) .

وتستمر قطعة الاختبار بالاستطالة المنتظمة مع زيادة الحمل، حتى تصل الى أقصى حمل عند نقطة (M) وتصبح مساحة المقطع العرضي بعد هذه النقطة أصغر، ويحدث التخصر (necking) (يتكون العنق). وينتج عن ذلك الحصول على زيادة في الاجهاد مع انخفاض في الحمل، لذا فإن حمل الكسر الحقيقي عند نقطة (B) اقل من الحمل عندنقطة (M) مع أن الاجهاد الحقيقي عند (B) اكبر من الاجهاد عند(M).

وتظهر في حالة الفولاذ منخفض الكاربون غير المصلد عند تجاوز حد المرونة، نقطة تحدث عندها زيادة في التمدد دون زيادة في الحمل. و تسمى هذه النقطة نقطة الخضوع (yield point) وتستحق هذه النقطة تأملاً أكبر.

**٣-٣-١٠ الرسم البياني للحمل – استطالة لفولاذ منخفض الكاربون غير المصلد:**

تبين من الشكل (10-10) انه بزيادة الحمل الشدي المسلط بعد نقطة (Q)نصل الى نقطة تحدث عندهااستطالة مفاجئة وكبيره نسبياً دون زيادة اضافيه في الحمل، وهذه هي نقطة خضوع. وهناك احياناً هبوط بسيط في الحمل عند نقطة الخضوع فتعطي نقطة خضوع عليا "$Y_u$"(Upper yield point) ونقطة خضوع سفلى "$Y_L$"(Lower yield point) وتتأثر القيمة عند $Y_u$ (أعلى حمل قبل حدوث الاستطالة المفاجئة) بالإنتهاء السطحي (surface finish) لقطعة الاختبار وبمعدل التحميل (rate of loading) . وتحدد نقطة الخضوع السفلى – عادة – (اي التحميل المسبب لاستطالة كبيرة) نظراً لقابلية تكرارها.




**الشكل (10-10) منحنى الحمل – الاستطالة لفولاذ منخفض الكاربون.**

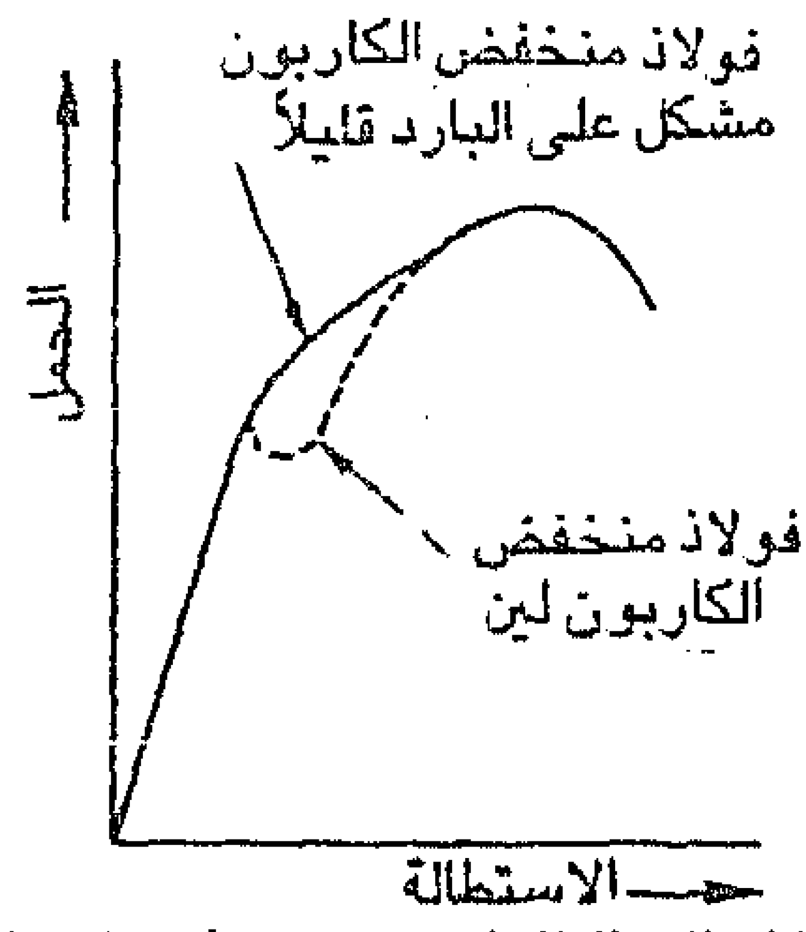
ويساعد وجود نقطة خضوع واضحة على تكوّن علامات الانفعال (تسمى بخطوط لودير Luder`s lines) على سطح الفولاذ. وعند زيادة الحمل بعد نقطة الخضوع يتصرف الفولاذ كما هو موصوف في الرسم البياني للحمل – الاستطالة.

وتُظهر بعض المواد فقط نقط خضوع واضحة. وتزال نقطة الخضوع في حالة الفولاذ منخفض الكاربون بالتشكيل على البارد بمقدار بسيط (كمرور بسيط عند الدحو على البارد (Light cold rolling pass) وينتج عند ذلك منحنى حمل/ استطالة بسيط (الشكل 10-11) ويبين الشكل (10-12) انواع مختلفة من منحنيات الحمل – الاستطالة لمواد معدنية.

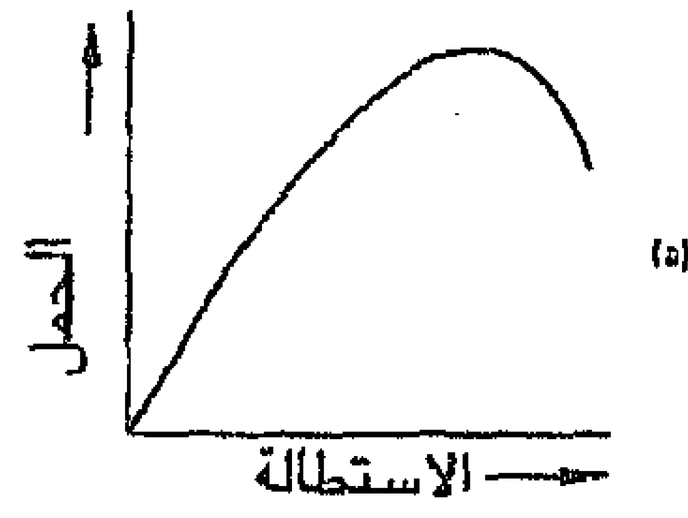
الشكل (10-13a) يمثل مادة ذات مرونة قليله ولدونه كبيره وهو يخص العديد من المعادن النقية.

الشكل (10-13b) يمثل مادة ذات مرونة قليله ولدونه صغيره جداً.

الشكل (10-13c) يمثل مادة ذات مرونه قليلة ولدونه محدودة.

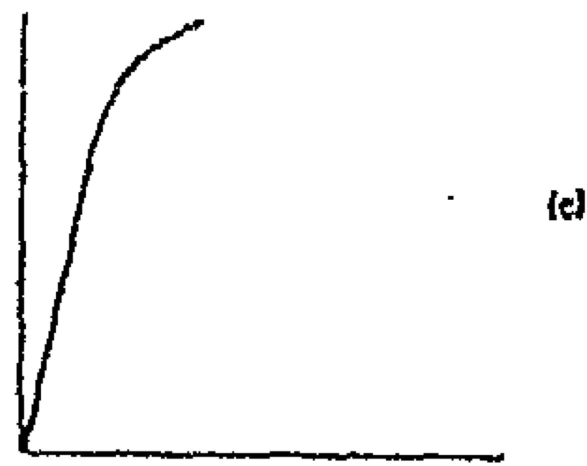


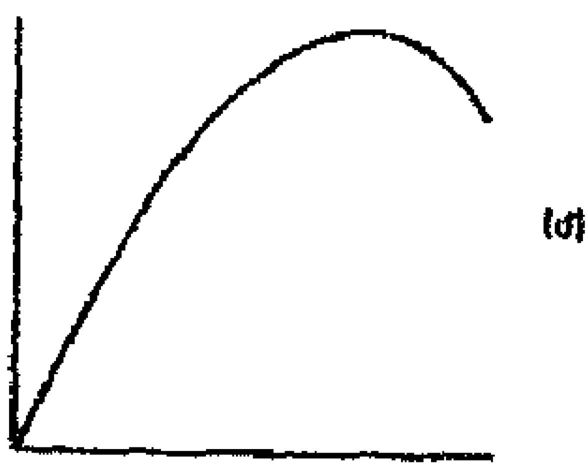

الشكل (10-11) ازالة نقطة الخضوع بتشكيل طفيف على البارد.









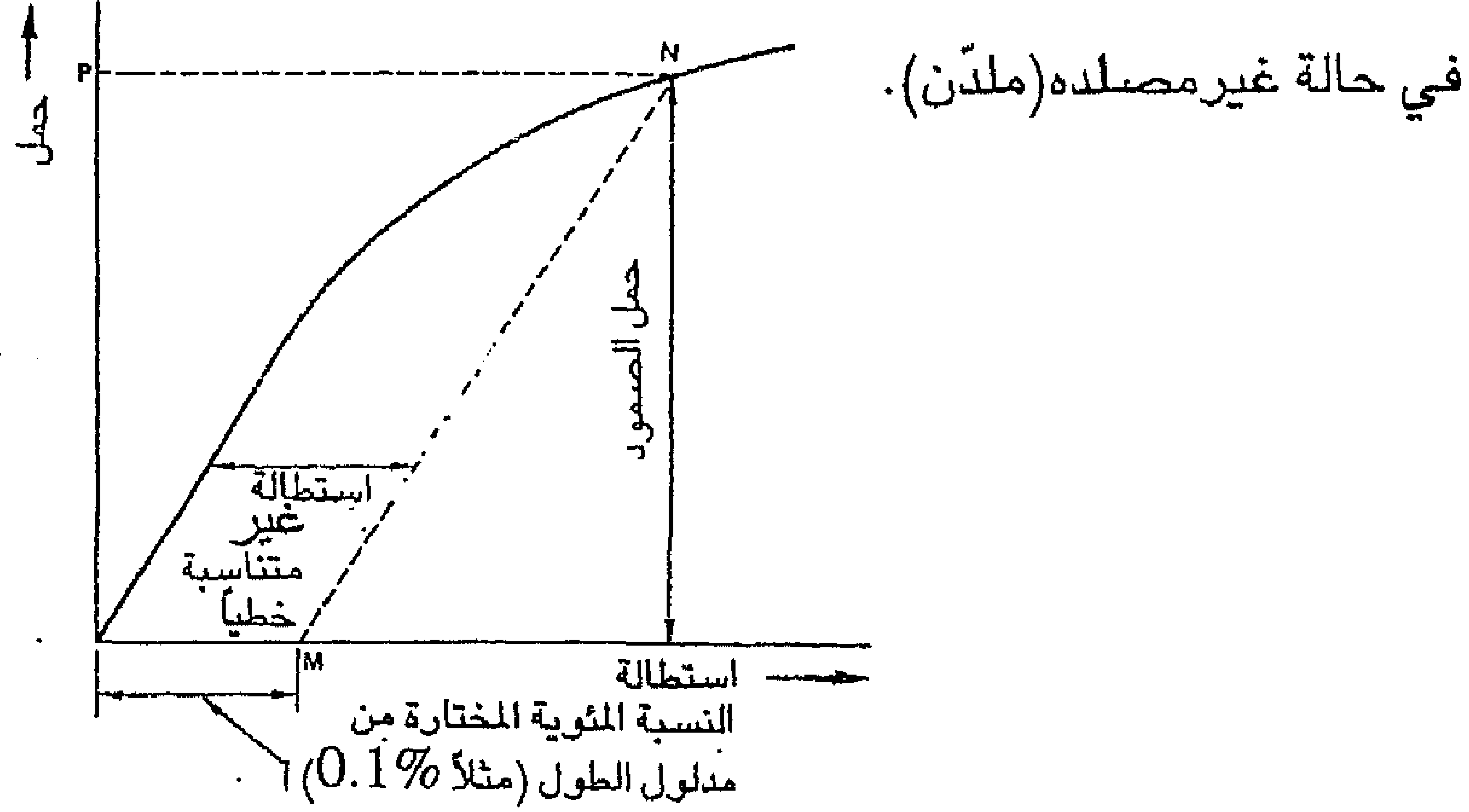




الشكل (10-12) أنواع منحنيات الحمل – الاستطالة الشائعة.

الشكل (13d-10) يمثل مادة ذات مرونة قليلة ولدونه جيدة.

الشكل (13e-10) يمثل مادة ذات مرونة قليله ولدونه جيده كما في الشكل (d) ويظهر فيه – ايضاً– نقطة خضوع حادة . وهو يخص الفولاذ المنخفض الكاربون في حالة غيرمصلده(ملدّن).




الشكل (13-10) كيفية ايجاد اجهاد الصمود.

## ٤-٣-١٠ اجهاد الصمود Proof stress :

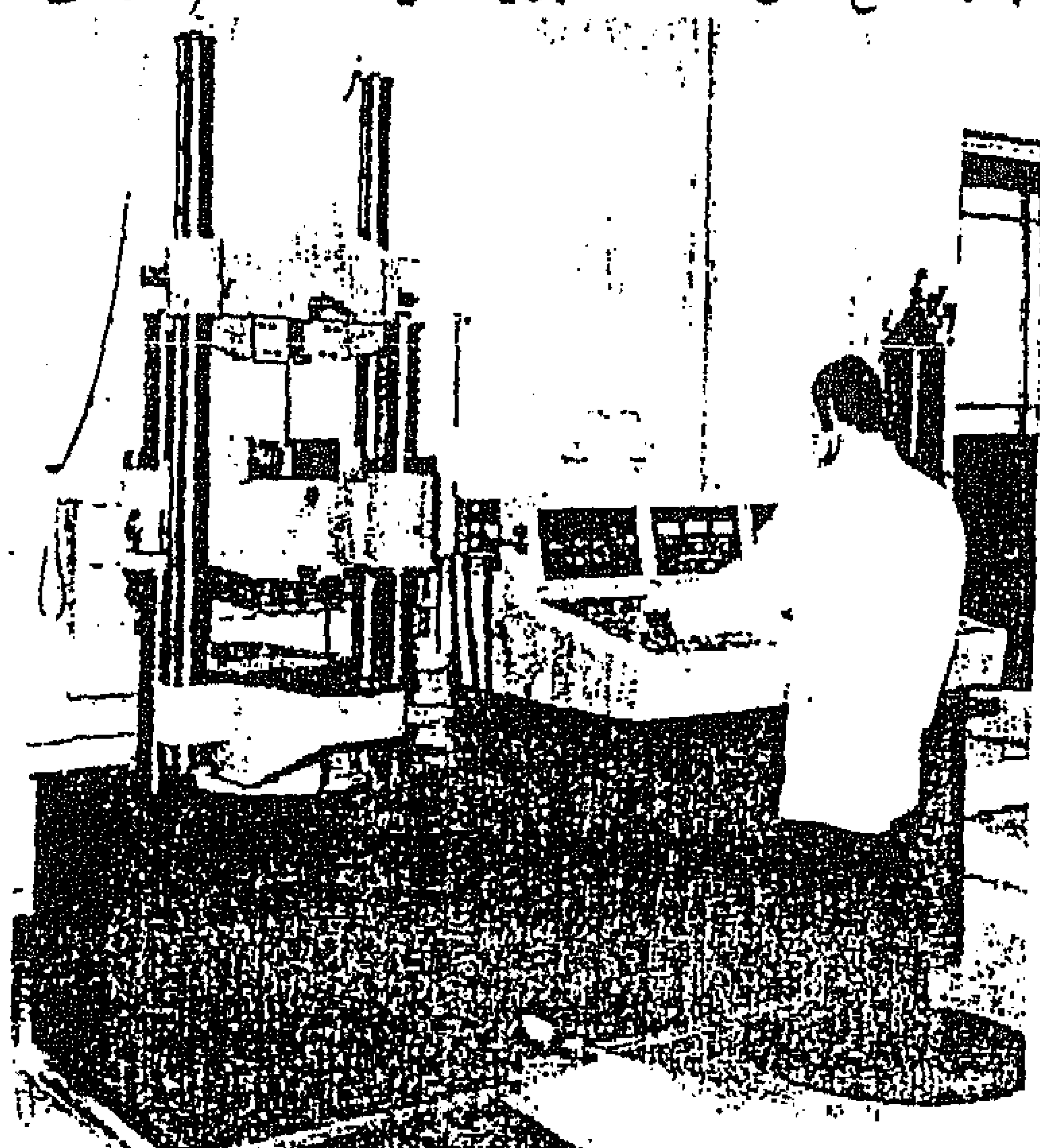
يستخدم اجهاد الصمود للمواد التي ليس لها نقطة خضوع حادة (كالفولاذ المصلد ومعظم المعادن والسبائك اللاحديدية) . وهو الاجهاد الذي ينتج عنه تمدد غير تناسبي (non - proportional) مساوياً الى نسبة مئوية معينه 0.5% أو0.3% أو 0.1% ) من مدلول مقياس الطول (gauge legth) عندما يكون الحمل مسلطاً. ومن الضروري استعمال مقياس استطالة قادر على قياس الاستطالة ضمن ±0.005% من مدلول الطول.

ويحدد حمل الصمود (Proof load) من منحنى الحمل – الاستطالة الشكل (13-10) ، حيث يرسم الخط "MN" موازِ الى الجزء المستقيم من المنحنى وبمسافة "OM" التي تمثل النسبة المئوية الخاصه من مدلول مقياس الطول. وتعطي نقطة تقاطع "MN" مع المنحنى (اي نقطة N ) حمل الصمود . فإذا كانت "OM" مساوية

الى 0.1% من مدلول مقياس الطول فإن "PO" هو 0.1% حمل الصمود والذي إذا قسم على مساحة المقطع العرضي الاصلي يعطي 0.1% اجهاد الصمود. ويرسم احياناً منحنى الاجهاد– الانفعال بدلاً من الرسم البياني للحمل – الاستطالة وعندئذٍ يمكن قراءة اجهاد الصمود مباشرة من الرسم . ان دقة الرسم البياني للحمل – الاستطالة (اجهاد – انفعال) ضرورية جداً.

## ٤-١٠ ١ اختبار الشد Tensile Testing :

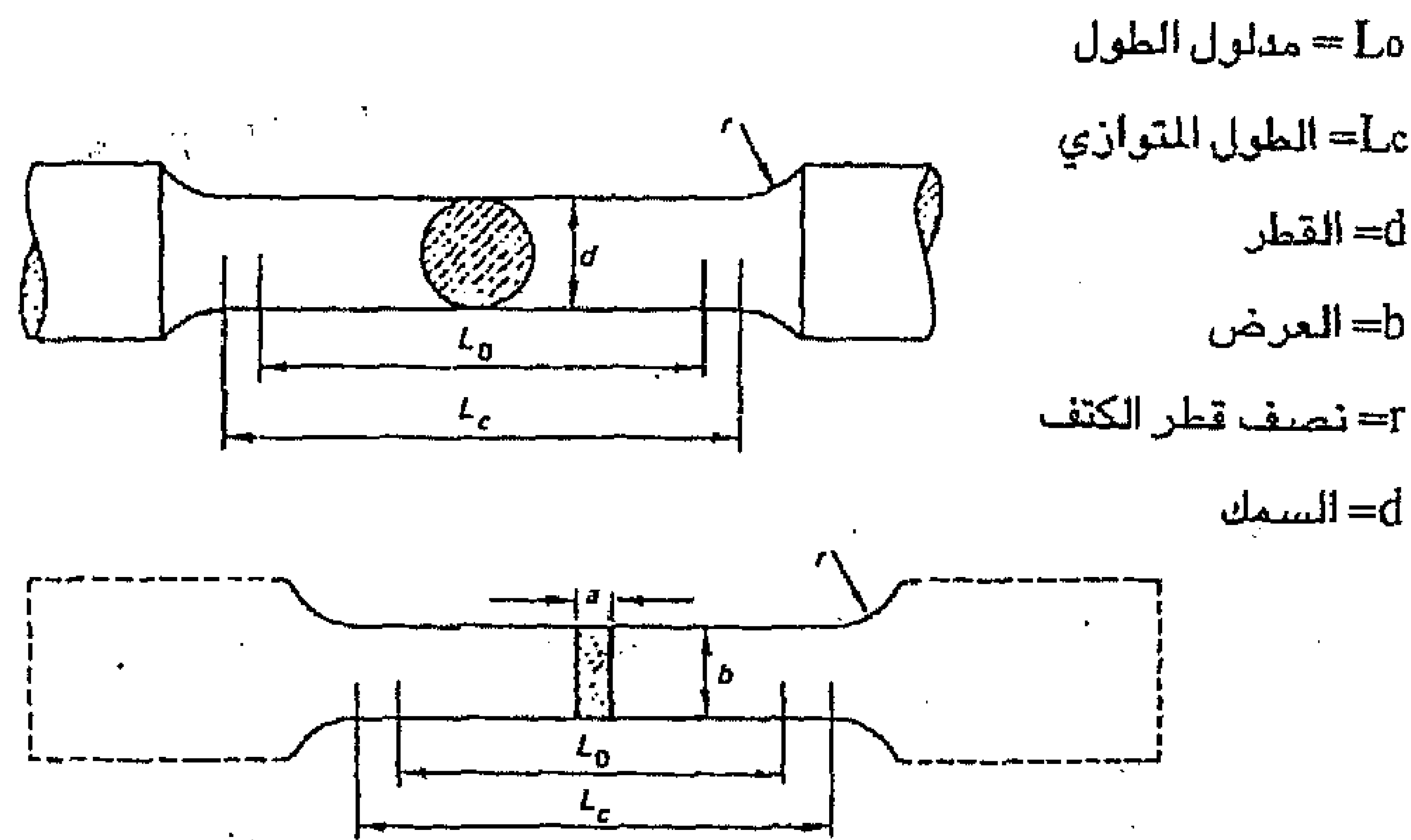
ان اختبار الشد أحد أكثر الاختبارات الميكانيكية استخداماً (الشكل10-14 ). وتعتمد النتائج التي يتم الحصول عليها – الى حد ما – على حجم وشكل مقطع الاختبار . لذلك من المفروض تطابق ابعاد قطع الاختبار مع الابعاد القياسية (star-dard dimensions) كتطابقها مع المواصفة البريطانية B518(طرائق اختبار شد المعادن).



الشكل (10-14) آلة اختبار شد شاملة.

وقد يكون المقطع العرضي لقطعة الاختبار مستديراً او مربعاً او مستطيلاً وكما مبين في الشكل (10-15). ويعرف مدلول مقياس الطول (gauge length) لقطعة الاختبار بأنه الجزء المتوازي المستخدم لقياس الاستطالة اثناء الاختبار او بعده.

ولتسجيل مدلول مقياس الطول "$L_0$" لقطعة الاختبار يتم تأشير الجزء المتوازي بعلامتين قبل الاختبار. وقد لوحظ من الفقرة (2-3-10) ان قطعة اختبار الشد تستطيل بشكل منتظم حتى تصل الى أقصى حمل مسلط ثم تحدث استطالة موضعية (Local extension) لنشوء التخصر (necking) لذلك فإن الاستطالة الكلية تتكون من جزئين منفصلين:




الشكل (15-10) قطع اختبار الشد.

أ- الإستطالة المنتظمة - التي تتناسب مع مدلول مقياس الطول .

ب- الاستطالة الموضعية - التي لاتعتمد على مدلول مقياس الطول ولكنها تتغير مع تغيّر مساحة المقطع العرضي لقطعة الاختبار. وبينت التجارب العملية ان قطع الاختبار المتشابهة هندسياً لمعدن ما تتشوه بطريقة متشابهة إذا كان:

$$\frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = \frac{\text{مدلول مقياس الطول}}{\sqrt{\text{مساحة المقطع العرضي}}} = \text{مقدار ثابت}$$

اي ان

$$L_0 = K \sqrt{S_0} \qquad \text{............ (11-10)}$$

حيث تمثل $S_o$ مساحة المقطع العرضي الاصلي في منطقة مدلول الطول.

يعرف هذا القانون بقانون باربا (Barba`s Law)ويسمح بتناسب مدلول مقياس الطول مع مساحة المقطع العرضي لقطعة الاختبار. و قيمة "K" القياسية 5.65 . وتعرف قطعة الاختبار التي تتطابق ابعادها مع العلاقة اعلاه بقطعة الاختبار التناسبية (proportional test piece) .

وهكذا فلقطعة اختبار تناسبيه مستديره ذات قطر أولي "d" فإن:

$$S_o = \frac{\pi d^2}{4} = 0.7854 \ d^2 .$$

وبالتعويض في (10-11) أعلاه

$$L_o = 5.65 \sqrt{S_o} = 5.65 \sqrt{0.785 d^2} = 5.65 x 0.8862 x d$$

أو أن

$$L_o = 5.0 \, d \quad .......... \quad (12\text{-}10)$$

ويعطي الجدول (10-6) بعض الامثلة لابعاد قطع اختبار تناسبية مستديرة وفق المواصفات البريطانية (British standards) . ولابد من ملاحظة ان الاقطار تم اختيارها لتعطي مساحات مقاطع عرضية ذات قيم عدديه مناسبه لتبسيط حساب الاجهاد. ويعطي الجدول (10-7) أبعاد قطع اختبار مستطيلة المقطع غير تناسبية وفق المواصفة البريطانية المستخدمة لاختبار الصفائح (sheets) والشرائط (strips)والألواح (Plates) والأنابيب والمقاطع المسطحة.

وبغض النظر عن التوصيات في الجدول (10-7) فقد يستعمل مدلول مقياس طول مساو الى $5.65 \sqrt{S_o}$ . ويسمح بمدلول مقياس طول 50mm او 200mm – بالتعاقب – لأي عرض ويحدد طول قطعة الاختبار بناء على ذلك.

**جدول (10-6) قطع اختبار تناسبية مستديره وفق المواصفه البريطانية.**

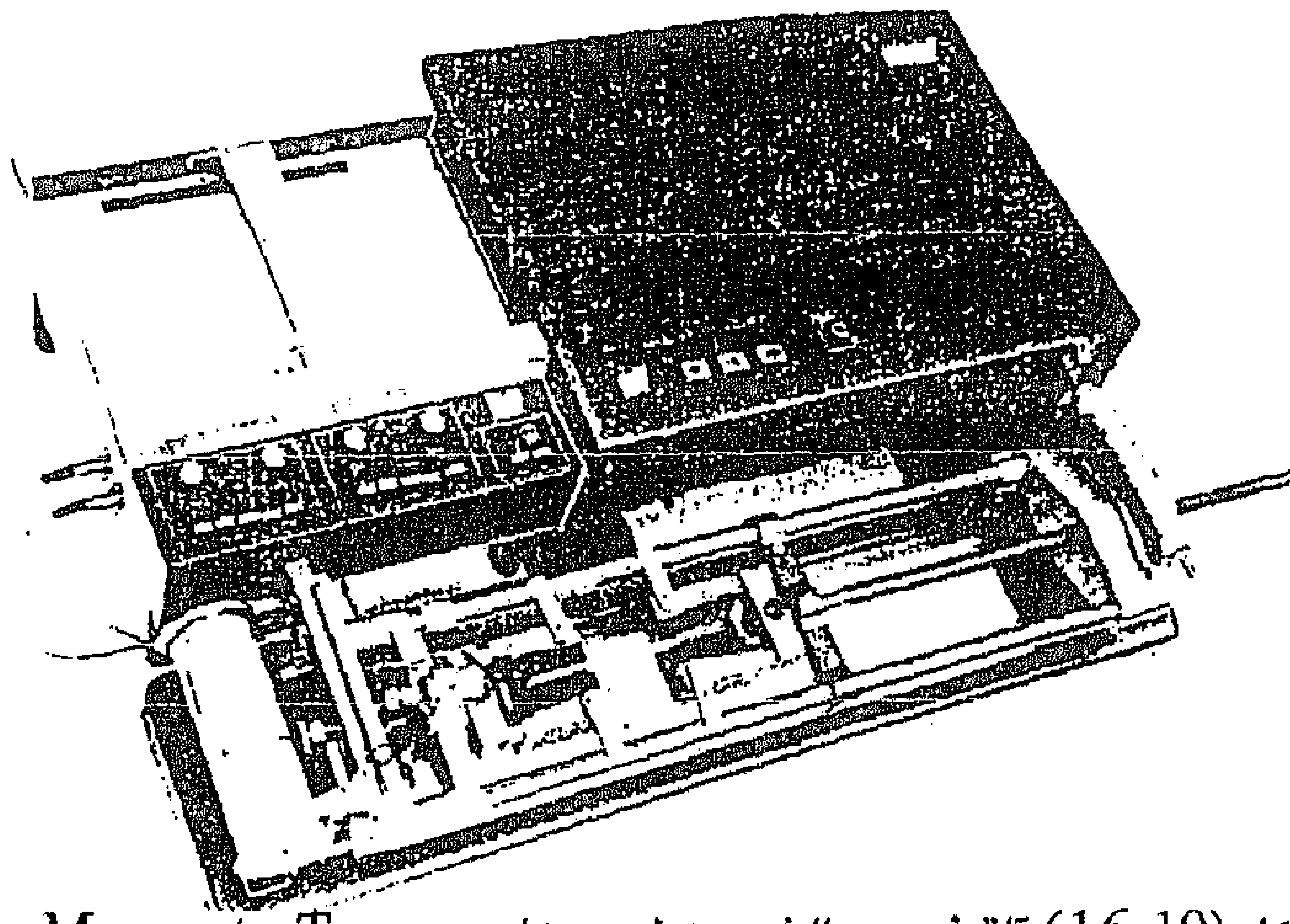
| ($S_o$) مساحة المقطع العرضي $mm^2$ | القطر (d) mm | مدلول قياس الطول ($L_o$) mm |
|---|---|---|
| 500 | 25.23 | 125 |
| 200 | 16 | 80 |
| 100 | 11.30 | 54.5 |

**جدول (10-7) قطع اختبار غير تناسبية مستطيلة وفق المواصفة البريطانية.**

| العرض (b)mm | مدلول مقياس الطول($L_o$)mm |
|---|---|
| 40 | 200 |
| 25 | 100 |
| 12.5 | 50 |

وعند توفر عينه صغيره – فقط – من المعدن الذي تعرّض للفشل فيحضّر منها قطعة اختبار مصغره (miniature). وقد تستعمل قطع اختبار مستديرة خاصة لها مدلول مقياس طول25.25mm وقطر 5.05mm . وتعطي هذه القطع مساحة مقطع عرضي $20mm^2$ ، وتستخدم اجهزة فحص من نوع (Monsanto Tensometer) لاختبارها (الشكل10-16 ).

ويجب ان يكون محور الشد منطبقاً على محور قطعة الاختبار. وقد تكون نهايات المسكه (gripped ends) منبسطة (Plain) او مدببه (headed) او ملولبه (screwed) لتلائم ماسكات (holders) آلة الاختبار. ولمنع حدوث الكسر بالقرب من نهايات المسكة فإن لقطع الاختبار أنصاف اقطار انتقالية ( transition radii)



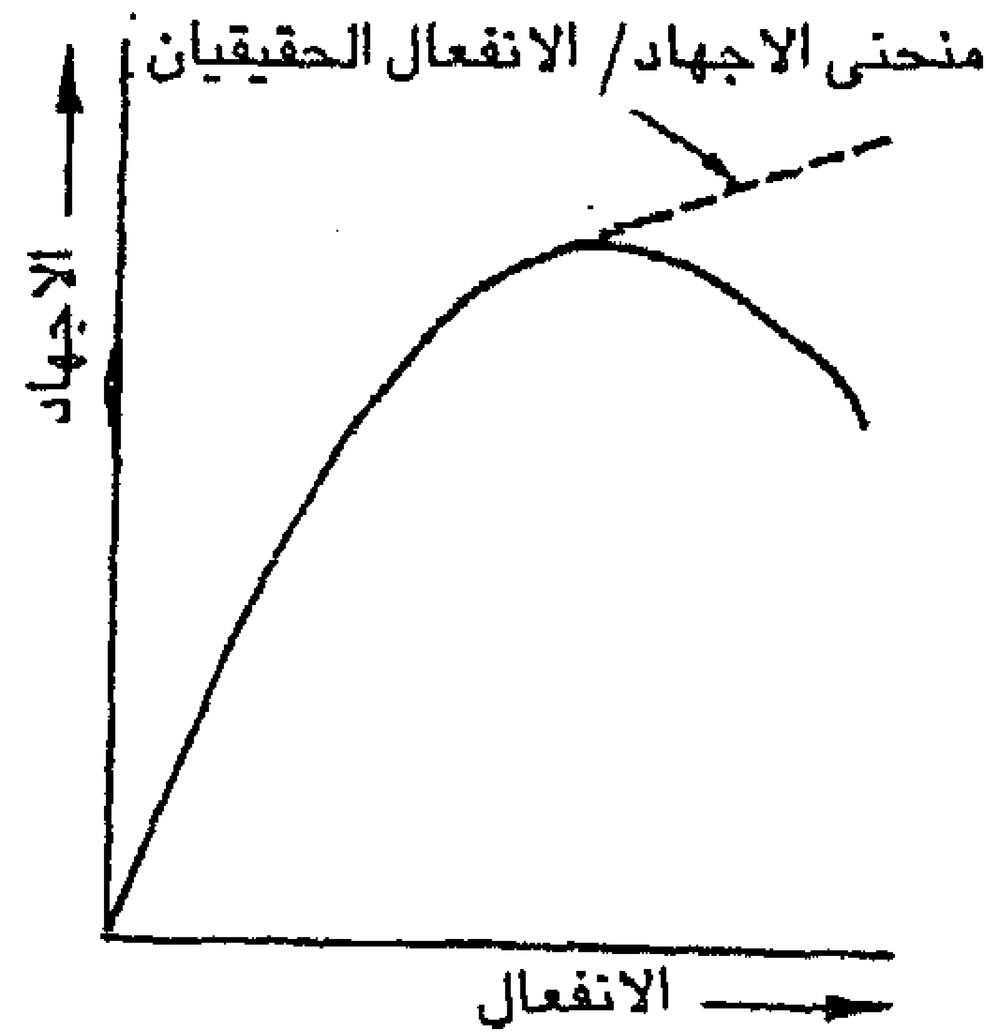
الشكل (10-16) آلة فحص الشد من نوع Monsanto Tensometer.

مابين النهايات والطول الموازي وكما مبين في الشكل (10-15). وتستخدم قطع اختبار بأنصاف أقطار اكبر للمعادن المسبوكة من أنصاف أقطار قطع اختبار من المعادن المشكلة.

ويقاس الحمل عند ما يستطيل (يتمدد) المعدن ببطء حتى نقطة انكساره ويتم ايجاد مقاومة الشد بتقسيم اقصى حمل تتحمله مساحة المقطع العرضي الاصلي.

ويسمى الاجهاد المحسوب لمساحة المقطع العرضي الذي افترض انه لايتغيّر، بالإجهاد الاسمي (nominal stress) . وتقل مساحة المقطع العرضي مع تمدد قطعة الاختبار لذلك إذا استخدمت مساحة المقطع العرضي الحقيقية عند اللحظة المطلوبة، سنحصل على الاجهاد الحقيقي (true stress) . والإجهاد الحقيقي اعلى من الاجهاد الإسمي (الشكل 10-17). وغالباً ما تعتبر مقاومة الشد كقاعدة فحص معتمدة للمواد. ويتم الحصول – ايضاً – من اختبار الشد على نسبة الاستطالة ونسبة انخفاض المساحة.

ويُعبر احياناً عن نتائج اختبار الشد كما يلي:




**الشكل (10-17) منحنى الاجهاد / الانفعال الحقيقي.**

$$\text{مقاومة الشد} = \frac{\text{الحمل الأعظم}}{\text{مساحة المقطع العرضي الاصلية لمدلول مقياس الطول}} \quad .......(10\text{-}13)$$

وبالطريقة نفسها يمكن حساب مقاومة الخضوع وحد المرونة وحد التناسب (Limit of proportionality) بقسمة الاحمال عند هذه النقاط على مساحة المقطع العرضي الاصلية.

$$\text{الاستطالة } \% = \frac{\text{الزيادة في مدلول مقياس الطول}}{\text{مدلول مقياس الطول الاصلي}} \times 100 \quad .........(10\text{-}14)$$

$$= \frac{\text{مدلول مقياس الطول النهائي} - \text{مدلول مقياس الطول الاصلي}}{\text{مدلول مقياس الطول الاصلي}} \times 100$$

$$\text{النقصان في المساحة } \% = \frac{\text{النقصان في مساحة المقطع العرضي}}{\text{مساحة المقطع العرضي الاصلي}} \times 100 \quad ......(10\text{-}15)$$

$$= \frac{\text{مساحة المقطع العرضي الاصلي} - \text{مساحة المقطع النهائى}}{\text{مساحة المقطع العرضي الاصلي}} \times 100$$

ان نسبة الاستطالة وانخفاض المساحة يعتبران مقياساً لمطيلية (ductility) الماده . وقد تكون الاستفادة من نسبة نقصان المساحة محدودة عند مفاضلتها مع الاستفادة من الاستطالة وذلك لان نسبة نقصان المساحة اقل اعتماداً على مدلول مقياس الطول المستخدم.

ويمكن تخمين مقاومة شد الفولاذ مع العلاقة التقريبية التالية :

مقاومة الشد = 3.4 × صلادة برينيل (HB) ........(16-10)

ولا تنطبق المعادلة اعلاه (16-10) على الفولاذ المشكل على البارد بشدة او الفولاذ الاوستنايتي.

## ١٠-٥ معامل الامان Factor of Safety :

يسعى المصمم المهندس الى ان يضمن ان ا لاجزاء لا تتكسر او تعاني من تغير دائم في الابعاد تحت الحمل المسلط. لذلك يجب ان لايتجاوز الاجهاد المتكون (الناشئ) حد مرونة الماده. ومع ذلك، غالباً ما يستخدم لاغراض التصميم اجهاد الخضوع او ا جهاد الصمود للمواد المطيلية (ductile materials). فضلاً عن ذلك ونظراً لامكانية ايجاد مقاومة شد المادة بطريقة تقليدية، فإن من المألوف عملياً استعمال مقاومة الشد مع معامل امان كقاعدة للتصميم.

$$\text{اجهاد التشغيل المأمون} = \frac{\text{مقاومة الشد}}{\text{معامل الامان}}$$ .............(17-10)

ويعتمد معامل الامان المستخدم في اية حالة خاصة على ظروف العمل ويتأثر بما يلي:

أ- نوع التحميل ، اي ان كان مستقراً ام حركياً (static or dynamic).

ب- نوع الماده.

جـ- احتمالية العيوب في ا المادة.

د- معدل احتمالية تلف (deterioration) الماده (بسبب البلى او التآكل).

هـ- مخاطر الفشل.

وقد يتراوح معامل الامان للفولاذ من حوالي (3) لحالات الحمل الساكن الى حوالي (15) للأحمال الصدمية (Shock Loads) . وربما يستعمل عامل امان أعلى (على سبيل المثال 20 ) عندما تكون هناك اجهادات متناوبه (alternating stresses) مع خطر كلال المعدن الذي يحدث لاحقاً (الفقرة 8-10).

## ١٠-٦ مقاومة الصدمة واختبارها Impact Strength & Testing

### ١٠-٦-١ الطاقة:

تدعى وحدة الطاقة وفقاً لنظام SI للوحدات بالجول (J) ، وهو الشغل المنجز عندما تزيح قوة مقدارها نيوتن واحد مسافة متر واحد باتجاه القوة.

### ١٠-٦-٢ المتانة الهشاشيه والمطيليه Toughness, brittleness & ductility

تعّرف المتانة بأنها قابلية الماده على امتصاص الطاقة والتشكيل تشكيلاً لدناً قبل الانكسار. وبما أن كمية التشوه اللدن الذي يحدث قبل الكسر هومقياس لمطيلية المعدن، والإجهاد المطلوب لاحداث الكسر هو مقياس لمقاومته، فإن المتانه تقرن مع مقاومة ومطيلية المعدن. وتسمى المادة التي لاتبدي تشوهاً لدناً او تبدي تشوهاً لدناً ضئيلاً قبل الانكسار بالماده الهشة. بينما تسمى المادة التي حدث فيها تشوهاً لدناً ملحوظاً قبل الكسر بالماده المطيليه.

ويعتمد نوع الفشل الذي يحدث على عدة عوامل تشتمل على مايلي:

أ- طبيعة الماده وحالتها المعدنية (الميتالورجيه).

ب- نوع الاجهاد.

جـ- معدل الاجهاد rate of stressing

د- درجة الحرارة.

هـ- الوسط (المحيط) environment .

وهكذا فإن المواد المعدنية التي تتصرف بطريقة متينه عند تحميلها ببطء ربما تفشل بكسر هشي عند تحميلها بسرعة عالية. فعلى سبيل المثال عند اختبار عينتين من نفس الفولاذ عوملتا معاملة حراريه مختلفة اختباراً شدياً عادياً فإن لهما خواص متشابهه، ولكن قد يبديان خواص مختلفة تماماً عند اختبارهما تحت معدلات تحميل سريعه. وقد لايعطي اختبار الشد المنجز ببطء اية نتائج متوقعة مثلما يعطي الاختبار المنجز بسرعه، لذلك فإن هناك حاجة لبعض الاختبارات الاضافية .ويتشابه تأثير نتائج التحميل السريع مع تلك التي يتم الحصول عليها إذا صنع حزّ في قطعة الاختبار.

**٣-٦-١٠ اختبار الصدمة لقضيب فيه حز:**

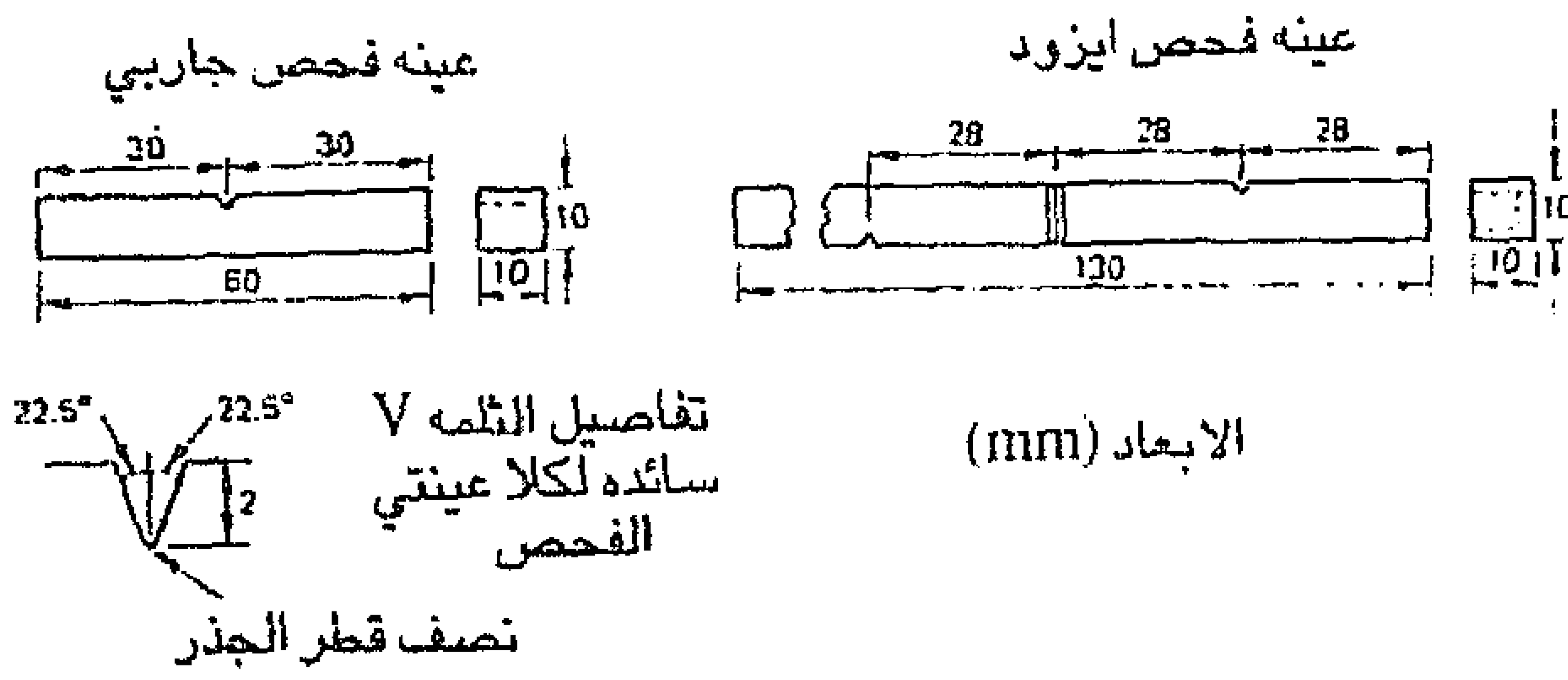
يستخدم اختبار الصدمة لقضيب فيه حز لقياس المتانة النسبية (relative toughness) للماده تحت ظروف الاختبار. يتم صدم قضيب فيه حز ذو ابعاد محدده ببندول سريع الحركة، وتقاس الطاقة الممتصة لكسر قطعة الاختبار بالجول (Joule) . ومن الملائم تسمية هذا النوع من الاختبار باختبار الصدمه لقضيب فيه حز وليس باختبار الصدمه فقط وذلك لأن الحز هو الاكثر اهمية وليس الصدمه. ويركز الحز الاجهادات، وربما تكون احدى المواد حساسة للحز اكثرمن الاخرى.

(ومن الناحية التجريبية نادراً ما يكون توزيع الاجهادات ضمن العينه او الجزء منتظماً، وينتج عن بعض العوامل – كالشكل shape – مناطق معينه ذات اجهادات عالية مقارنة بالمناطق الاخرى مولده مواضع لتركز الاجهادات).

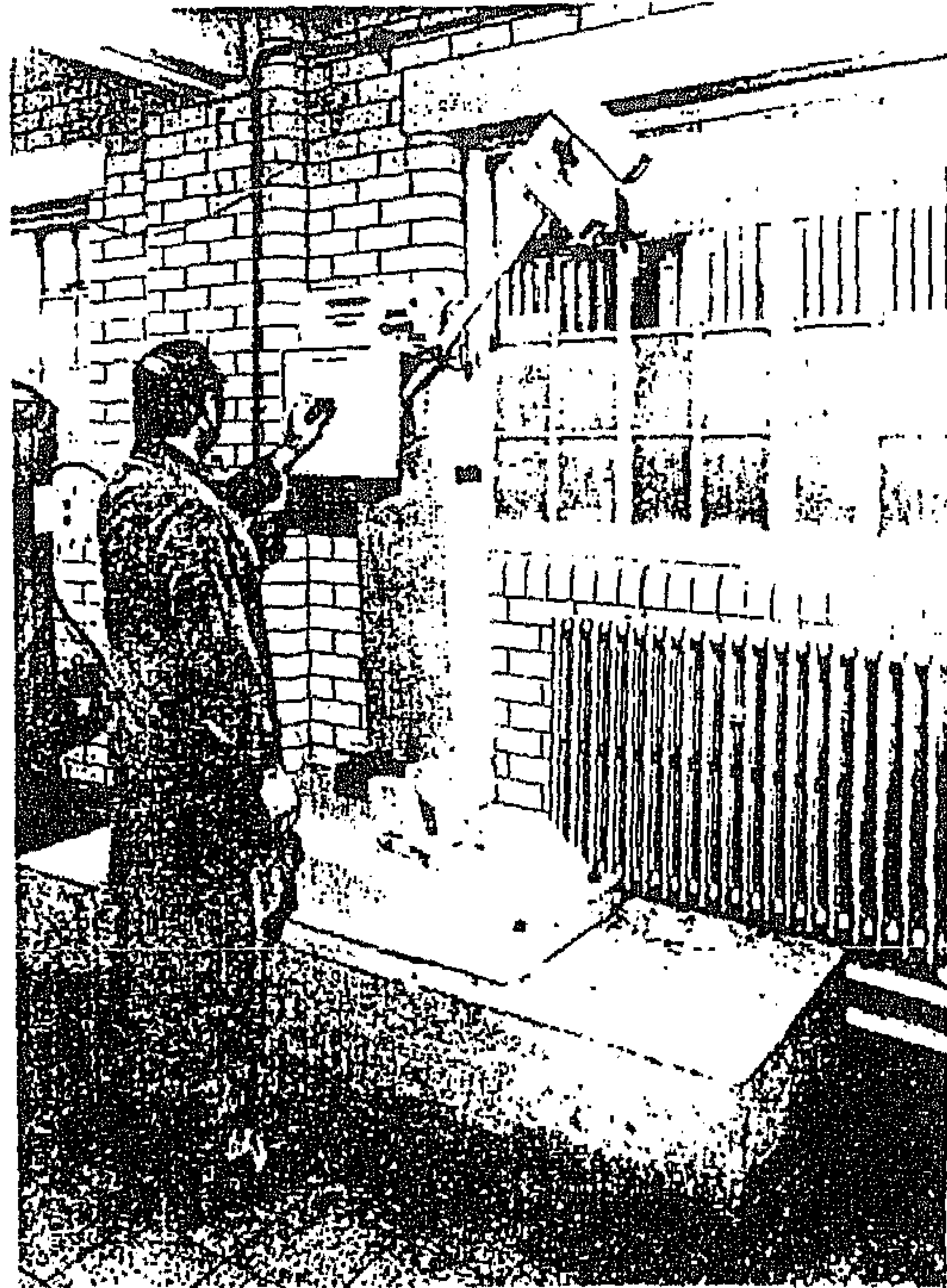
وتتأثر النتائج بمقدار كبير بنوع الحز (على شكل V أو U ) وَجِدة الحز notch) (sharpness، اذ يحتاج الحز الاكثر حدة الى كمية قليلة من الطاقة لحدوث الكسر. ومع ذلك فإن الحز في قطع الاختبار الكبيرة المقطع لايعطي النتائج ذاتها التي يتم الحصول عليها من قطع اختبار صغيرة المقطع (Small - section). ويمكن المقارنة مابين النتائج التي يتم الحصول عليها من قطع اختبار متشابهة الابعاد.

ان درجة حرارة الاختبار هي أحد العوامل المهمة ايضاً فعند انخفاض درجة الحرارة تزداد مقاومة الخضوع وينتج عن ذلك نقصان ملحوظ في مطيلية بعض المواد، وإذا اشتمل الاختبار على تحميل سريع – ايضاً – فإن المواد المطيلية ربما تفشل بأسلوب هش . فعند معدلات تحميل منخفضة فإن الفولاذ منخفض الكاربون يكون متيناً ومطيلياً عند درجات حرارية اعلى من حوالي $150^{\circ}C$ – ، ولكن تحت حالات تحميل بالصدمة يحدث تحول من مكسر ليفي متين Tough fibrous) (fructure الى مكسر هش عند حوالي الصفر المئوي. وتعتمد درجة حرارة التحول على التكوين الكيماوي للفولاذ ايضاً. وبالنسبة لماده معينه تعزز درجة الحرارة المنخفضة ومعدل الانفعال العالي والحجم الحبيبي الكبير صفة الهشاشية.

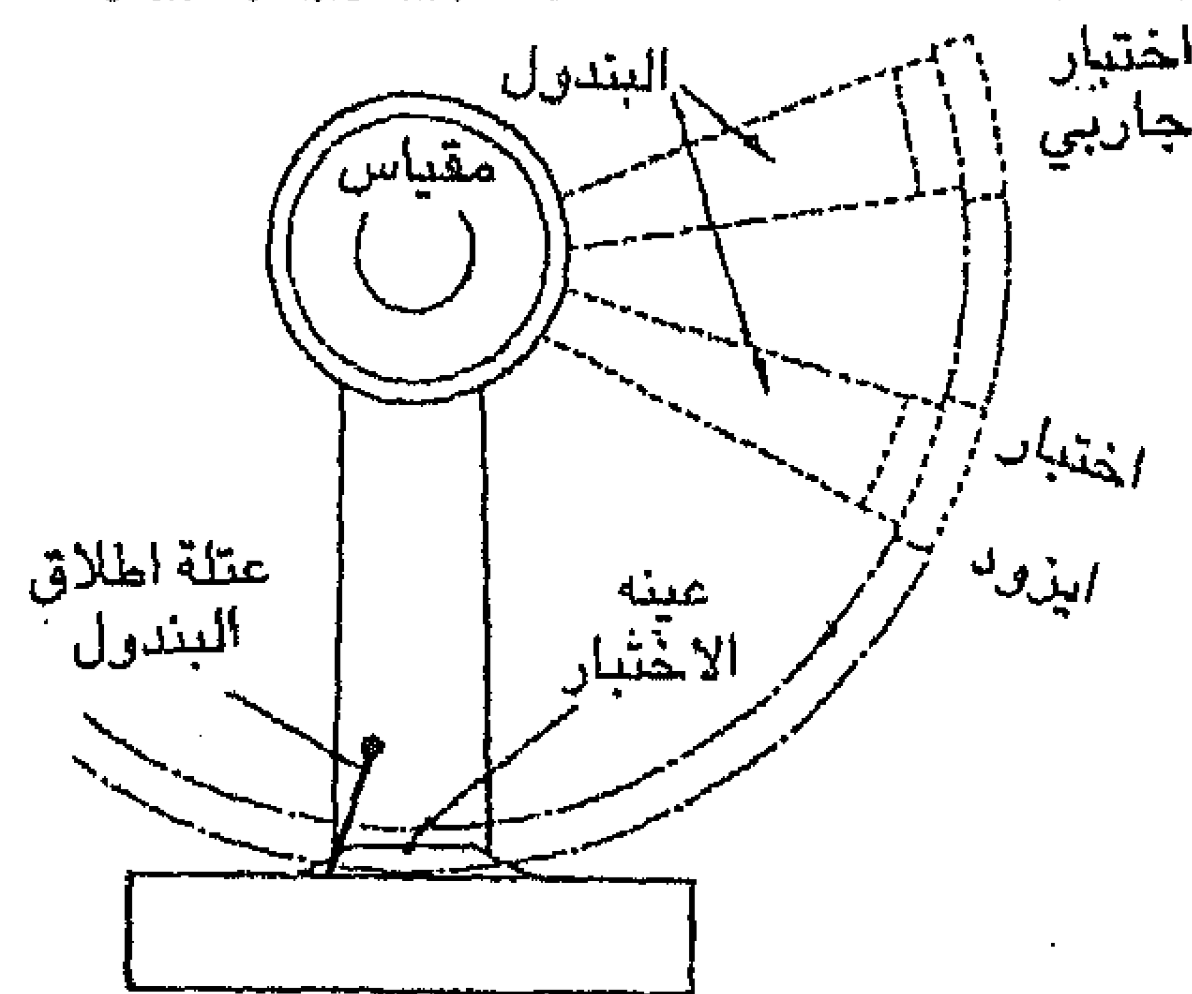
ولاتعتبر قيمة صدمة القضيب المحتوي على حز خاصية اساسية للماده، ولكن يستفاد منها في التنبؤ بسلوك الماده تحت حالات صدمية معينه وتكشف عن الميل للهشاشة التي لايمكن استظهارها باختبار الشد او اختبار الصلادة. واحدى الاستخدامات المهمة لهذا الاختبار هو تحديد هل ان المعاملة الحرارية للمادة تتم بصورة صحيحة ام لا. ولايعتد بنتيجة الصدمة لقضيب فيه حز لوحدها بل تقرن بنتائج اختبارات اخرى كالشد و الصلادة.




الشكل (10-18) عينات ايزود وشاربي المحززه.



الشكل (10-19) الة اختبار الصدمة.




الشكل (10-20) مخطط لإحدى آلات اختبار الصدمه الشامل.

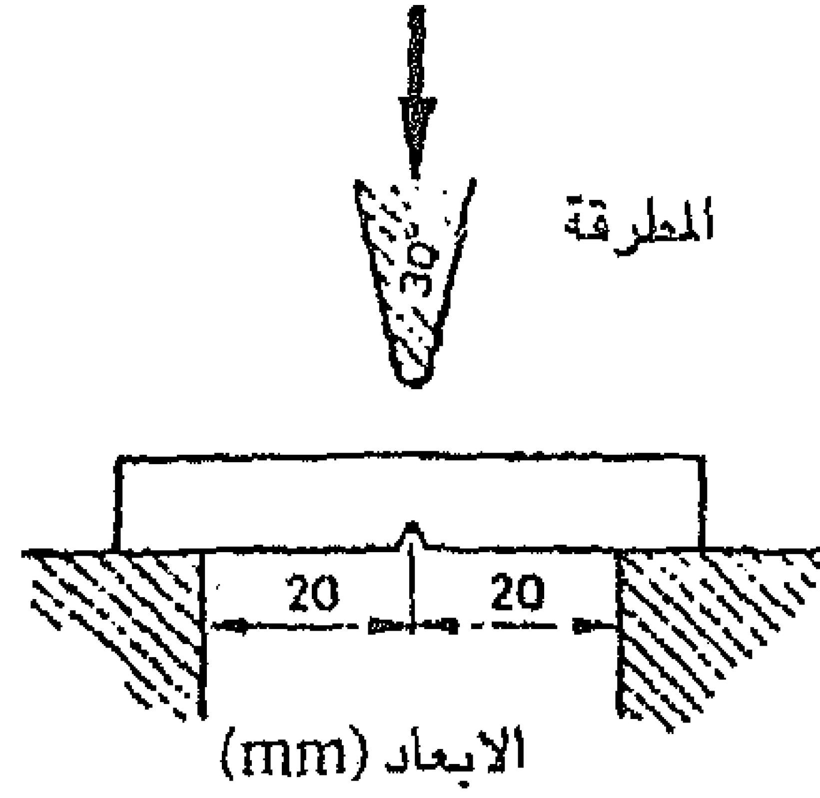
## ٤-٦-١٠ اختباري شاربي وأيزود بالصدمة Charpy &Izod impact test :

يشتمل كل من اختباري شاربي وايزود على قياس الطاقة الممتصة في كسر قطعة اختبار فيهاحز (الشكل 10-18) وذلك بضربها ببندول سريع الحركة. ويبين الشكل (10-19) الة اختبار صدمه شامل الذي يمكن استخدامه لاختبار صدمة شاربي وايزود . ويتم تحرير البندول في اختبار ايزود من الموضع الواطء ليعطي طاقة اصطدام (Striking energy) مقدارها 163 J او نحو ذلك بينما يحرر البندول في اختبار شاربي من أعلى موضع ليعطي طاقة اصطدام مقدارها 250 J تقريباً وحسب التصميم . وقد صممت الة الاختبار بحيث يهمل اي فقدان للطاقة نتيجة للإهتزازات في هيكلها اثناء الفحص .ويجب ربط الالة باحكام بمسامير ملولبه مثبّته بأرضية كونكريته لايقل سمكها عن 15cm لأن اي افتقار في الجساءة عند تثبيت الآلة سيؤثر على مقدار الطاقة الممتصة.

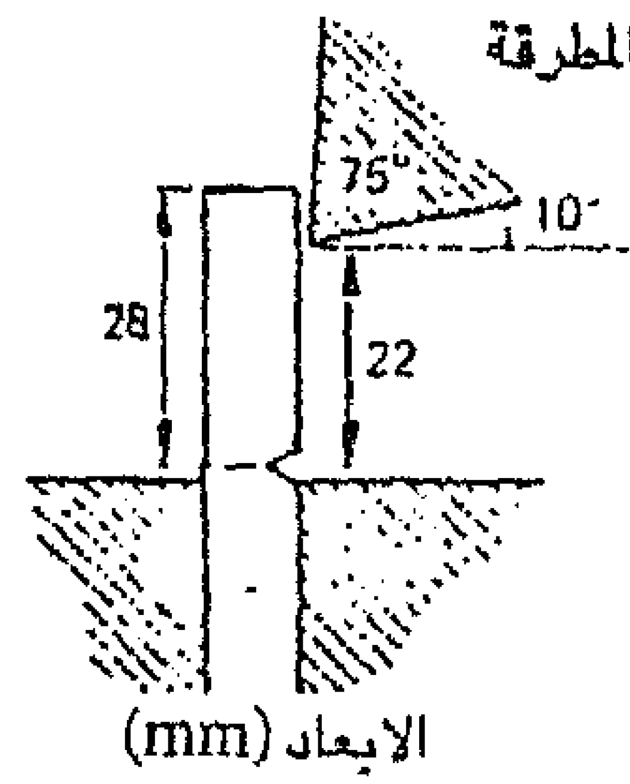
يبين الشكل (10-20) عمل آلة الاختبار، فعند تحرير البندول سيسقط تحت تأثير الجاذبية ويصطدم بقطعة الاختبار عند اوطأ نقطة من مساره وبطاقة حركية عالية. تكسر هذه الطاقة قطعة الاختبار، وبما أن قليل من الطاقة يتم امتصاصه في الكسر، فإن البندول سوف لن يرتفع الى نفس الارتفاع من الجانب الآخر. والفرق في ارتفاع البندول يمثل مقياس للطاقة المستنفذة في كسر قطعة الاختبار. ان المؤشر الذي يقيس الارتفاع الاخير للبندول أثناء الحركة مدرّج بوحدات الجول وبذلك يمكن قراءة الطاقة الممتصة في الكسر مباشرة من على المؤشر.

تثبت قطعة الاختبار في طريقة شاربي من طرفيها مع جعل الحز عند المنتصف وتحرر المطرقة لتكون الصدمة مباشرة خلف الحز (الشكل10-21) .

وتثبت قطعة الاختبار في طريقة ايزود عمودياً بواسطة ملزمة (Vice) بحيث يكون مستوى الحز عند حافة الملزمة. وتحرر مطرقة الصدمة من نفس جانب الحز وعند ارتفاع ثابت اعلى من الحز (الشكل 10-22).




**الشكل (10-21) اختبار جاربي.**




**الشكل (10-22) اختبار ايزود.**

وبما ان عينة اختبار شاربي لاتحتاج للتثبيت في موضعها (كما هو الحال في اختبار ايزود) فإنها تستخدم بسهولة اكبر لاختبار العينات عند درجات حرارية مختلفة، وتبعاً لذلك حل اختبار شاربي ، حالياً، وبصورة كبيره محل اختبار ايزود.

ويمكن الحصول على معلومات اضافية عن اختبار الصدمة لقضيب فيه حز من المقاييس البريطانية BS 131 القسم الأول الى الخامس.

## ٧-١٠ الزحف Creep :

يشير مصطلح الزحف الى التشويه اللدن البطيء الذي يحدث مع التحميل الطويل وعند درجات حراريه عاليه عادة (بين 0.3 الى $0.4\ T_m$ للمعادن و 0.4 الى $0.5T_m$ للخزفيات، حيث تمثل $T_m$ درجة الحرارة المطلقة لانصهار تلك المادة).
وتعاني المعادن اللينه (كالرصاص) من الزحف عند درجة حرارة الغرفة، ولكن يظهر الزحف في معظم المواد المعدنية عند الدرجات الحرارية العاليه. وبصوره عامة، تبدي المواد ذات درجات الانصهار العالية افضل مقاومة للزحف. وربما ينتج عن هذا التشويه التدريجي وعلى مدى فترة زمنية طويلة الكسر عند اجهادات اقل من مقاومة المادة الاعتيادية. لذلك من الضروري عند تخمين سلوك معدن تحت الاجهاد وعند درجات حراريه عالية الاخذ بنظر الاعتبار عامل الزمن لعدم توقف الانفعال بعد تسليط الحمل مباشرة بل يستمر مع الزمن، وقد يؤدي في النهاية الى الكسر البلوري البيني (Crystalline fracture) .

وقد يحدث الزحف تحت شد ثابت (Static tension)أو تحت الانضغاط او الثني او اللي او تحت الاجهاد القصي إلا أنه غالباً ماتتم دراسته تحت حالات الشد والحمل الثابت (constant Load). ان الزحف مهم في الاستخدامات التالية:

أ- المعادن اللينه المستخدمة عند درجات حراريه قريبة من درجة حرارة الغرفة كأنابيب الرصاص ومعادن المرتكزات البيضاء (white metal bearings) .

ب- الوحدات الصناعية العامله عند درجات حراريه عالية كمعدات الافران والتوربينات الغازية والوحدات الصناعية والكيماوية والبخارية.

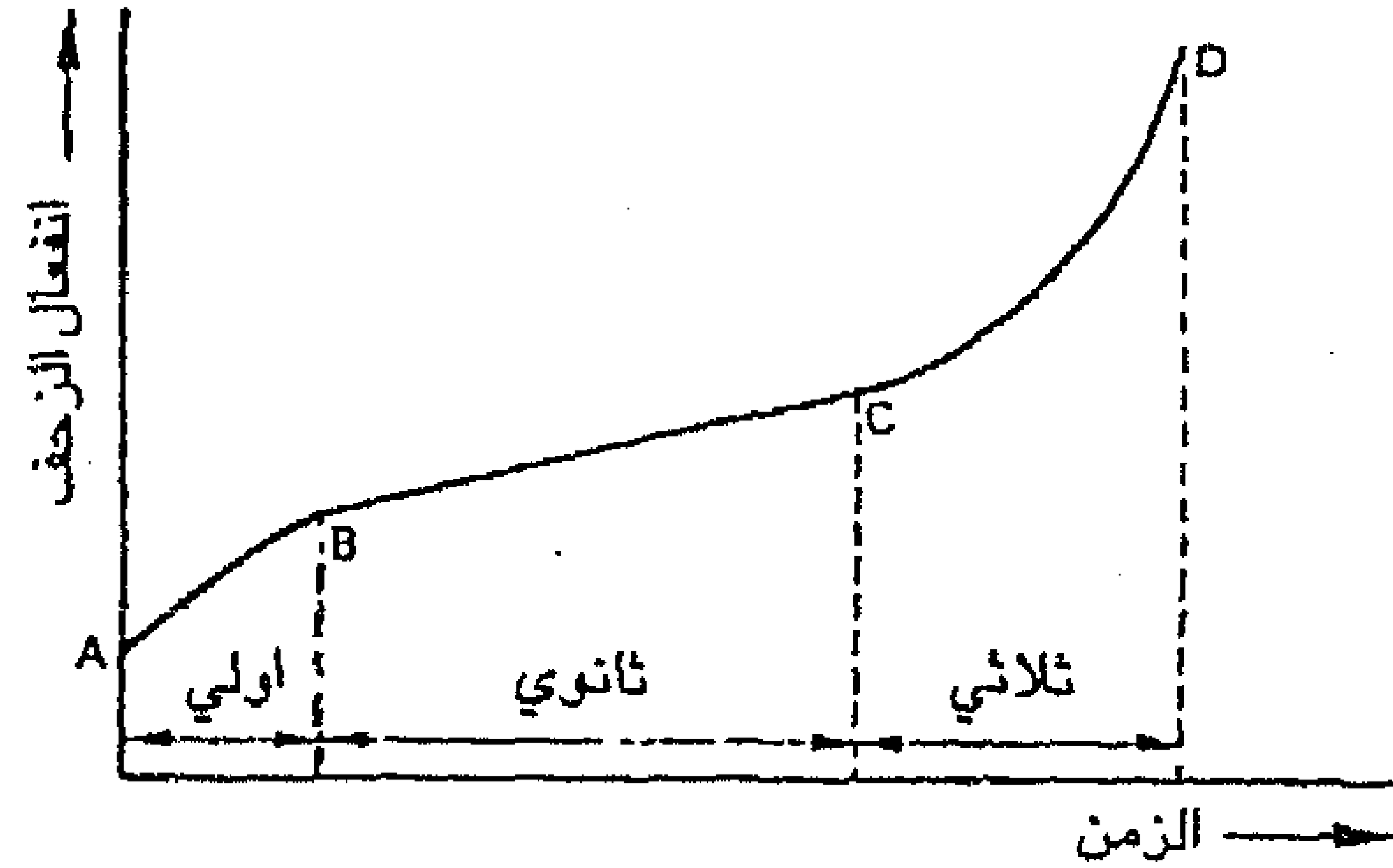
وعند تصميم وحده صناعية للعمل بكفاءة عند درجات حراريه اعلى من درجات حرارة الجو، فلابد من الاخذ بالإعتبار اقصى انفعال مسموح به وعواقب الكسر والعمر المتوقع للوحده الصناعية. وتعتمد هذه الاعتبارات وبشكل كبير على نوع الجزء وظروف عمله.

ويمكن دراسة الزحف الناتج عن حمل شد ثابت بقياس الاستطالة الدائمية بعد فترات زمنية مختلفة لقطع الاختبار و عند درجة حراريه ثابته. وعند رسم انفعال الزحف مع الزمن نحصل على منحنٍ كالذي مبين في الشكل (10-23). فبعد الاستطالة اللحظية الابتدائية (Intial instentaneous extension) يمكن ملاحظة ان المنحنى يتكون من ثلاثة اجزاء.

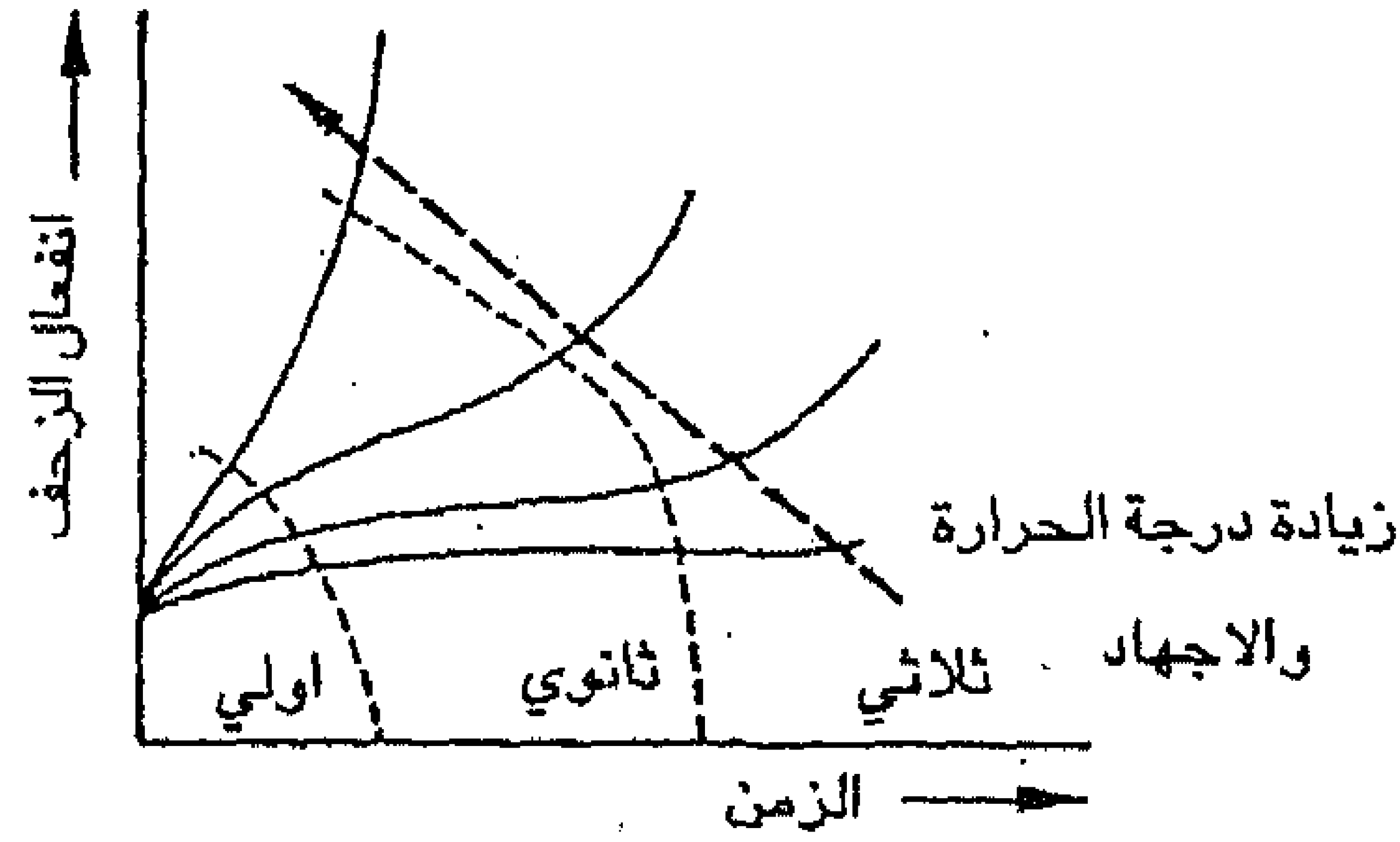
أ- المرحلة الابتدائية (AB) والتي يرافق التشويه فيها الاصلاد الانفعالي، والذي يقلل وبسرعة معدل الانفعال.

ب- المرحلة الثانية (BC) والتي يكون فيها معدل الانفعال ثابتاً تقريباً. وهذه الحالة المستقرة هي اهم جزء في المنحنى حيث يعطي العمر التخميني للجزء.

جـ-المرحلة الثالثة (CD) والتي يزداد فيها معدل الانفعال بسرعة نتيجة للتخصر الموضعي لقطعة الاختبار او تكوّن الفجوات الداخليه (internal cavities) مما يزيد في الاجهاد المؤثر وحدوث الكسر عند نقطة (D). ولايمكن في العديد من الحالات تميز المراحل الثلاثة في المنحنى بوضوح. وللحصول على صورة متكاملة لخواص زحف المادة، فمن الضروري الحصول على عدة منحنيات للزحف ولمدى من الاجهادات والدرجات الحراريه. ويظهر من بعض المنحنيات (الشكل 10-24) انه مع تناقص الاجهاد المسلط تتناقص المرحله الابتدائية وتمتد المرحلة الثانية بينما تميل الاستطالة خلال المرحلة الثالثة الى الزيادة . اما عند تسليط اجهاد منخفض جداً فلا تظهر مرحلة الزحف الثالثة حتى بعد فترة عمل طويلة.




**الشكل (10-23) منحنى الزحف يبين المراحل الثلاثة للزحف.**




**الشكل (10-24) انواع منحنيات الزحف.**

## ١-٧-١٠ اختبار الزحف:

تستخدم اغلب ا ختبارات الزحف اجهادات شديدة وقطع اختبار شديه. ويستغرق اختبار الشد وقتاً طويلاً، وتحتوي مختبرات اختيار الزحف غالباً على مئات من مكائن الاختبار التي تستعمل باستمرار. ويمكن ان تستوعب المكائن عدة قطع اختبار .وتستخدم اوزان ثابتة ينقل تأثيرهاعبر عتلات لتعطي حملاً ثابتاً. وتوضع قطع الاختبار داخل افران المقاومة الكهربائية من النوع الانبوبي التي تحافظ على درجة حرارة الاختبار بدقة ولفترة طويلة من الزمن. ومن الضروري

الحفاظ على انتظام توزيع درجة الحرارة على طول مدلول مقياس الطول لقطعة الاختبار. ولابد من الحفاظ على الحرارة ضمن الحدود المبينه في المواصفه البريطانية BS 3500 وكما يلي (استخدام مزدوج حراري من البلاتين/ البلاتين – 13% روديوم).

لحد 600C° ضمن مدى ±3C°

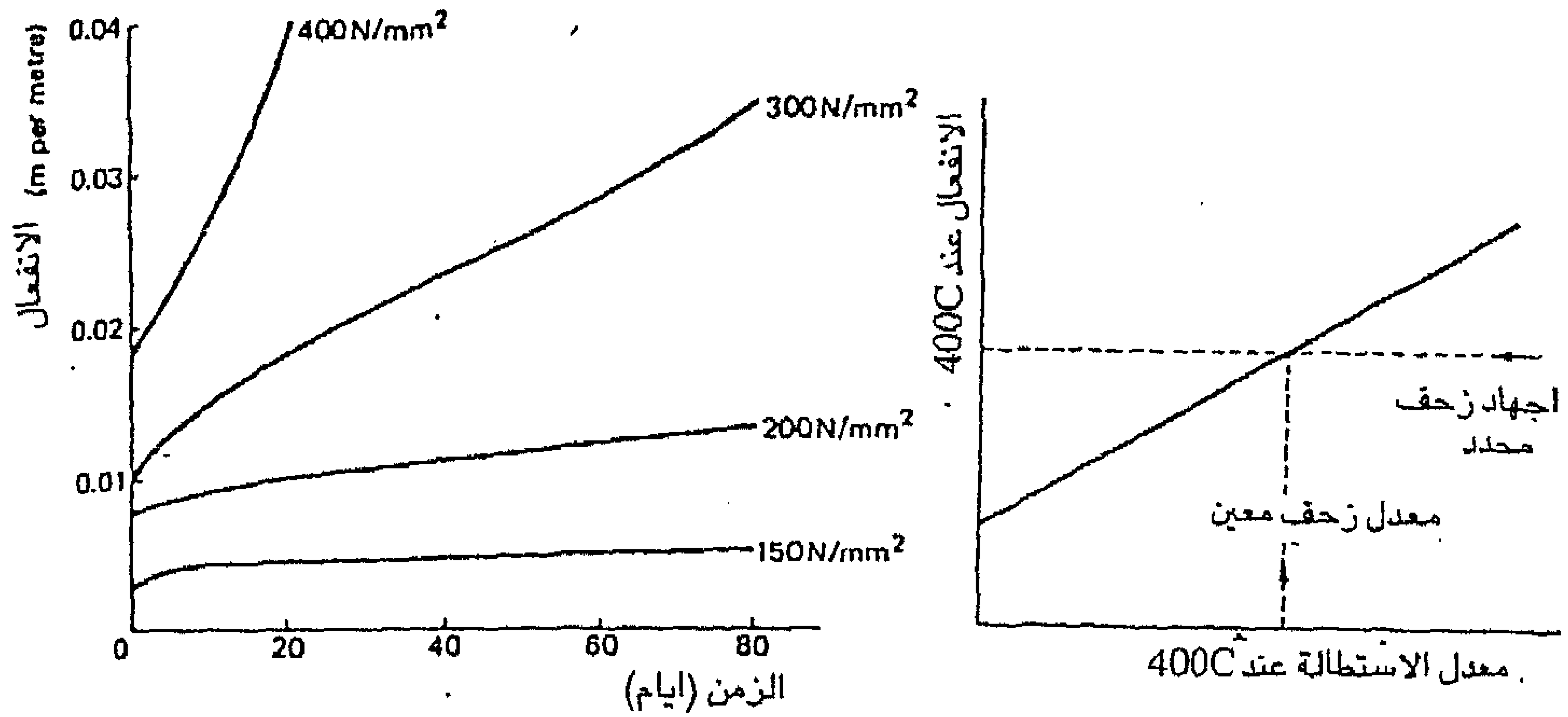
600 – 800C° ضمن مدى ±4 C°

800 – 1000 C° ضمن مدى ±6 C° .

ويستخدم للاختبارات الطويلة مقياس استطالة (extensometer) عالي الحساسية قادر على قياس معدل زحف مقداره $1x10^{-8}$ بالساعة.

وتلاحظ قراءات مقياس الاستطالة عند فترات زمنية منتظمة حتى الحصول على التشوه المطلوب او الوصول الى انكسار العينات ، اعتماداً على الغاية من الاختبار هل هو ايجاد معدل الزحف او ايجاد الانفعال الكلي للزحف.

وقد تستعمل سلسلة من اختبارات الانفعال – الزمن ، ذات اجهادات مختلفة وربما تسلط عند درجة حراره معينه، ويخمن اجهاد الزحف المحدود (Limiting creep stress) لحالات معينه ذات معدل زحف صغير من منحني الاجهاد – معدل التمدد (شكل 10-25).




الشكل(25-10)

a) منحنى الزحف لفولاذ ذو نسبة كاربون 0.4% عند 400°C.

b) تعيين اجهاد الزحف المحدود.

ان الاختبار الطويل مهم للحصول على معلومات تصميميه يعول عليها لتخمين السلوك المحتمل للمادة عند العمل لعدة سنوات. وربما يظهر الخطأ من استقراء نتائج الاختبارات قصيرة الزمن التي قد لاتعطي كافة التغيرات المحتمله في البنيه(كإندماج جسيمات الكاربيد مثلاً).

ويستفاد من الاختبارات القصيرة الزمن في تطوير السبائك وفي السيطره على الانتاج. وقد تستعمل ايضاً في الحصول على بيانات عامه عن سلوك المادة اضافة الى مقارنة اوليه ما بين المواد المختلفة . ان الاختبار المألوف هو تحديد اجهاد الخضوع الزمني (وهو الاجهاد الذي ينتج عنه مقدار معين من الزحف عند زمن ثابت، كثلاثة ايام على سبيل المثال). والاختبار القصير الاخر هو اختبار الاجهاد –

التهشم stress - rupture test ) والمستخدم لتحديد الزمن حتى التهشم تحت حالات معينه من درجه الحراره والاجهاد مع قياس الانفعال التقريبي باستعمال محدد قياس ذي مقياس قرصي (dial gauge) اثناء الاختبار . ويستفاد من هذا الاختبار عند السماح بحدوث تشويه الزحف دون السماح بالكسر. وقد يعبّر عن النتائج بالاجهاد الاقل الذي سيحدث عنده التهشم في وقت معين(على سبيل المثال 1000 hr ) .

**٨-١٠ الكلال Fatigue :**

يستخدم مصطلح الكلال لبيان فشل المواد المعدنية تحت احمال متغيره متكررة. فإذا عُرّضت ماده الى اجهاد متكرر او متغير دورياً، فإنها ربما تتعرض في النهاية الى الفشل حتى ولو كان اقصى اجهاد مسلط يقل بكثير عن الاجهاد اللازم لحدوث الكسر في حالة الاختبار المستقر (static test) قصير الامد. ويشار الى هذا النوع من الفشل بفشل الكلال وللمكسر الناتج مظهر مميز. وتتعرض العديد من الاجزاء الهندسية الى احمال متغيره (كما في المحركات ذات المكابس اذ يتعرض ذراع التوصيل الى السحب و الدفع باستمرار)، ويكون فشلها ناتجاً عن الكلال – غالباً – وليس من الضروري ان تتعرض المادة بأكملها الى اجهادات متغيره، ويحدث فشل الكلال غالباً عند المنطقة السطحية ذات الإجهاد الاكبر. وربما يأخذ تكرار الاجهاد شكل شد متكرر او ضغط او صدمه او ليّ (Twisting) او تناوب الشد والانضغاط او تناوب الثني والليّ.

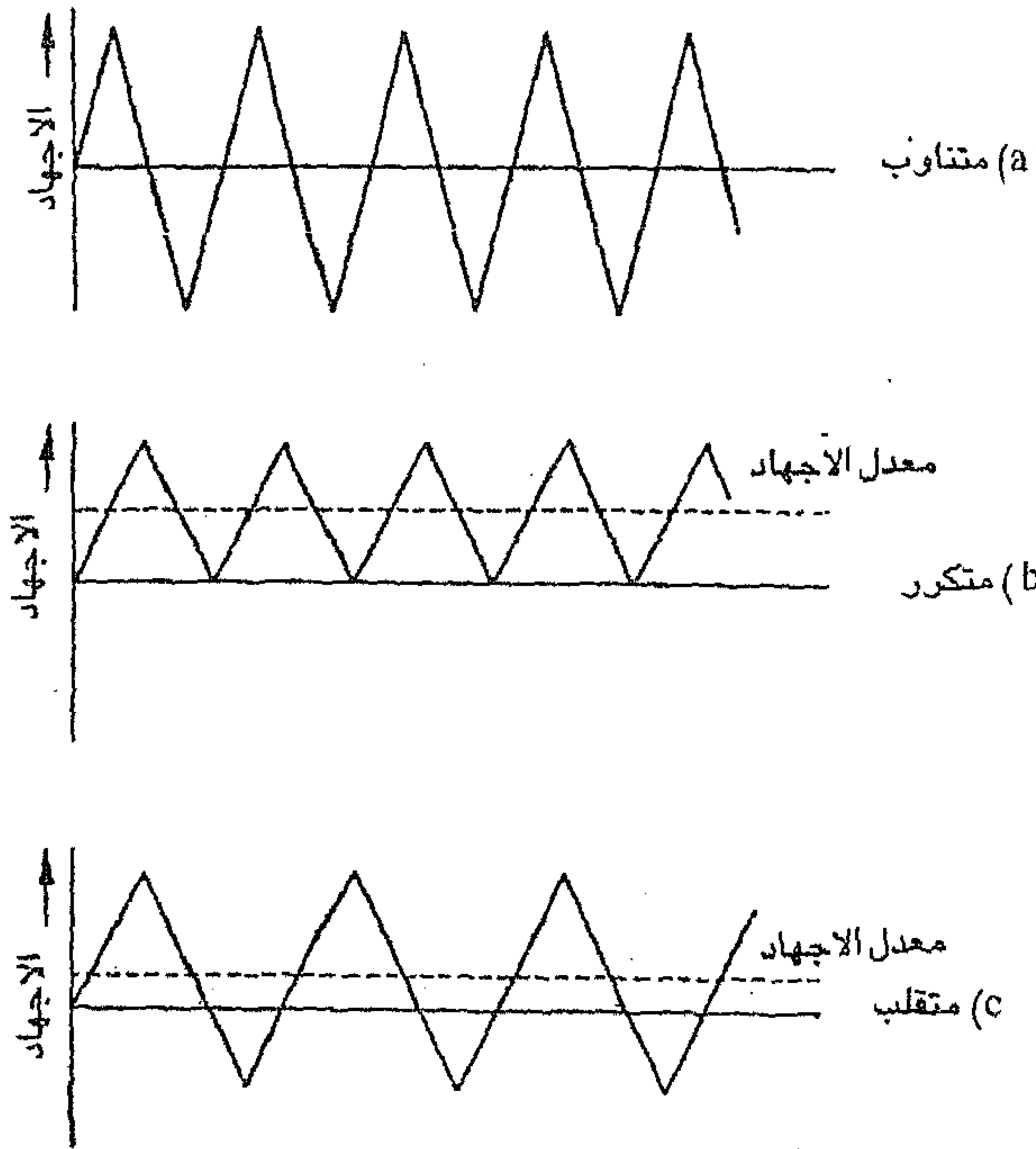
ويسمى التغيّرالمتكرر في اجهادات الكلال دورة الاجهاد (stress cycle) (المصطلحات المستخدمة اضافة الى دورات الاجهاد معرّفة في المواصفة البريطانية BS 3518 ) . ويمكن تصنيف انواع دورات الاجهاد التي ربما تتعرض اليها المادة الى المتناوبه (alternating) والمتكررة (repeating) او المتقلبة (fluctuation) (الشكل

26-10) . ففي دورة الاجهاد المتناوب فإن قيمة متوسط الاجهاد تساوي صفراً. وتتباين قيمة دورة الاجهاد المتكرر من صفر الى اقصى قيمة له، بينما لايكون الاجهاد الادنى او متوسط الاجهاد مساوياً للصفر في دورة الاجهاد المتقلب. و ربما يتعرض الجزء الى حمل ثابت اضافي إضافة الى الحمل المتقلب (fluctuating Load) .

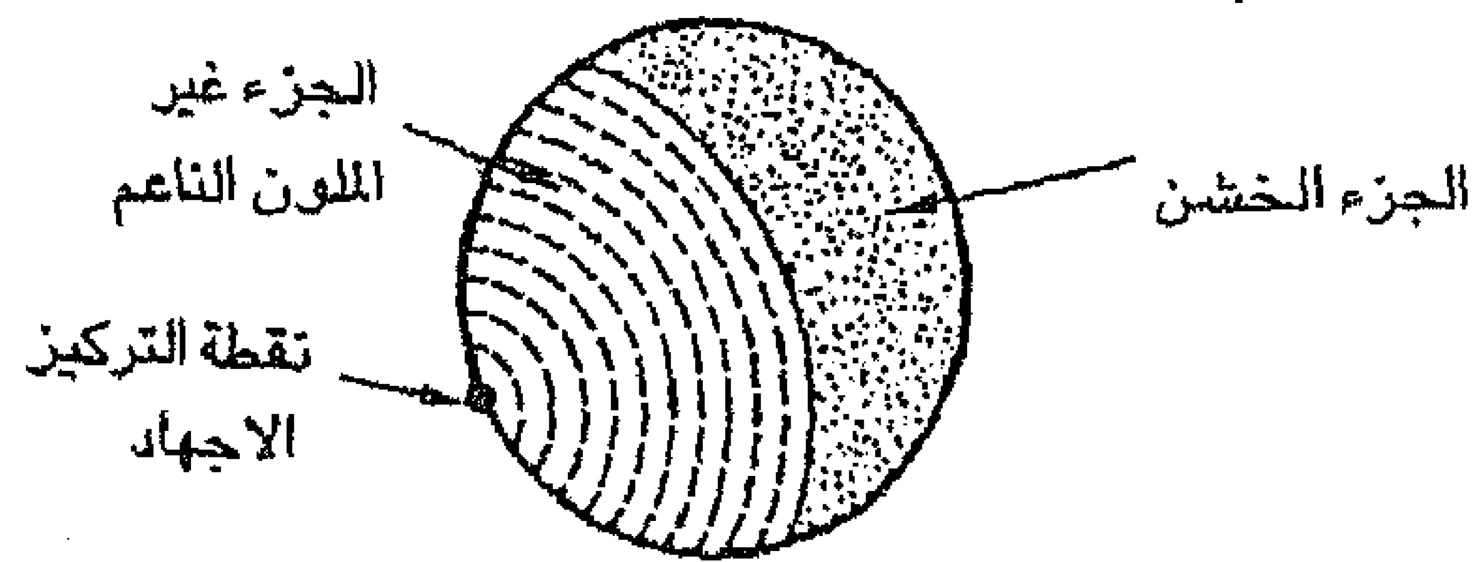
ويبدأ فشل الكلال بتكون شق صغير يكاد يكون دائماً بالقرب من السطح. ويمتد هذا الشق ببطء الى داخل الماده كشق ضيق حتى يصبح المقطع العرضي غير المكسور من العينه او الجزء غير قادر على تحمل الحمل طويلاً. وتبدو آلية تكون شقوق الكلال – ايضاً – مشابهة لالية تكوّن الشقوق في المواد الهشة إلا أنها في الحقيقة تنشأ بوساطة التشويه اللدن كما يتبين ذلك من ظهور أشرطة الانزلاق (Slip bands) على سطح المادة اثناء الاجهاد الدوري (Cyclic stressing) .

ويمكن تمييز الكسر النهائي الناتج عن فشل الكلال بسهولة لان سطح الكسر يتصف بمنطقتين واضحتين (الشكل 10-27) ، احدى هاتين المنطقتين ناعمة (smooth) وغير ملونه ولها علامات تموج (rippled markings) تشبه صدفة المحار والاخرى لماعه ذات مظهر بلوري او ليفي. ويبين الجزء الناعم التقدم التدريجي للشق من نقطة ما من نقاط تركز الاجهاد . وهذه النقطة عادة توجد عند السطح او بالقرب منه اما كحز ناتج عن عدم انتظام السطح (خدش او زوايا حاده) او كعيوب البنيه (كالمكتنفات او الفجوات)، وتنكسر المنطقة الاخرى والتي تبدو خشنه بفعل فشل شدي بسيط ، اي اما بكسر لدن او بكسر هش.

ولايمكن تمييز هذا الاختلاف في المظهر مابين هاتين المنطقتين في مواد المعدنيه الاكثر هشاشيه عند فشلها بالكلال.




الشكل (10-26) انواع دورات الاجهاد.




الشكل (10-27) كسر نموذجي السبب هو الكلال.

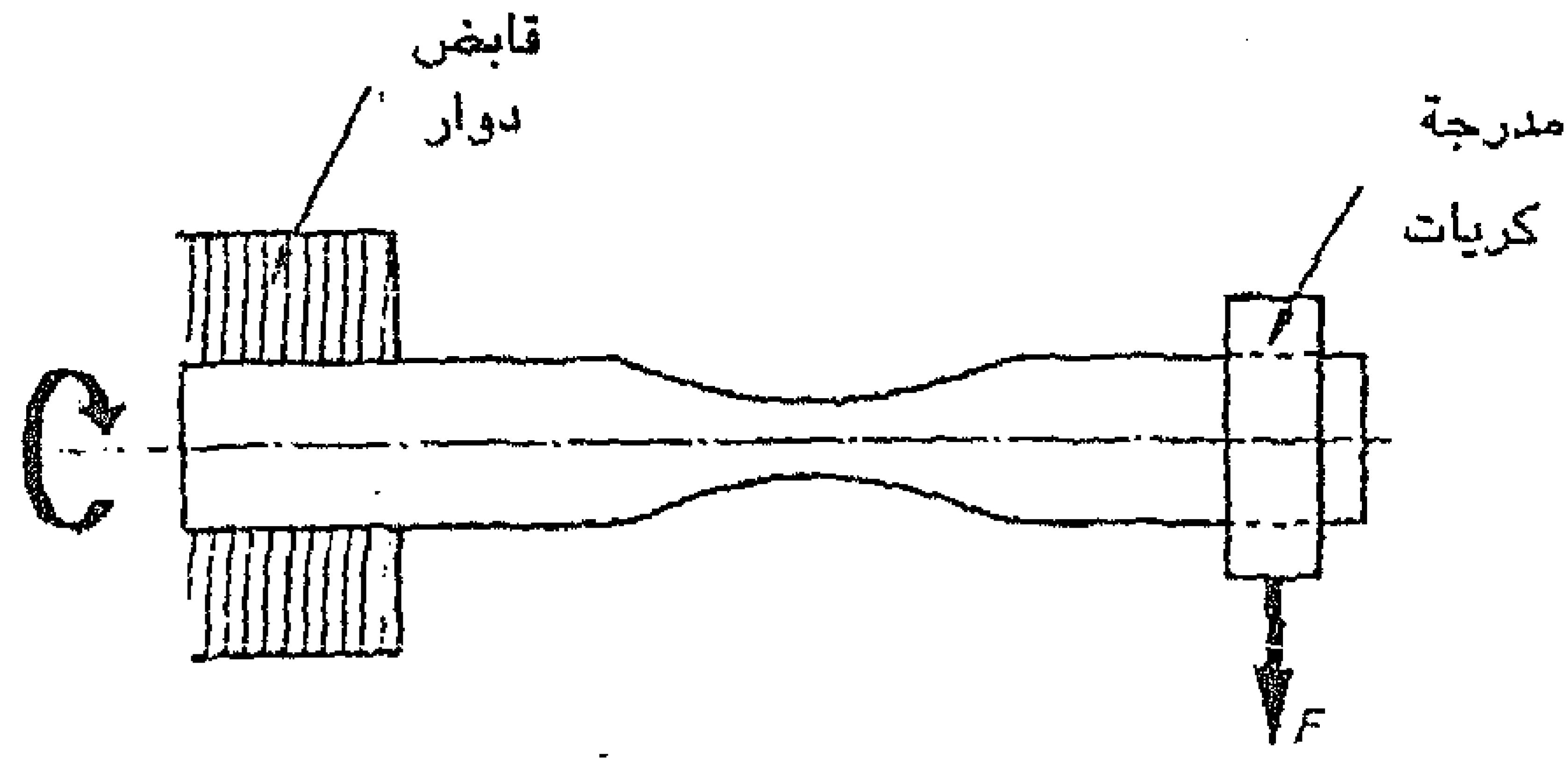
## ١-٨-١٠ اختبار الكلال:

لابد من اختيار قطع اختبار كبيره الحجم تحت حالات قريبة قدر الامكان من تلك الموجودة في الخدمة لضمان الارتباط بالأداء أثناء الخدمة ، ومع ذلك يمكن

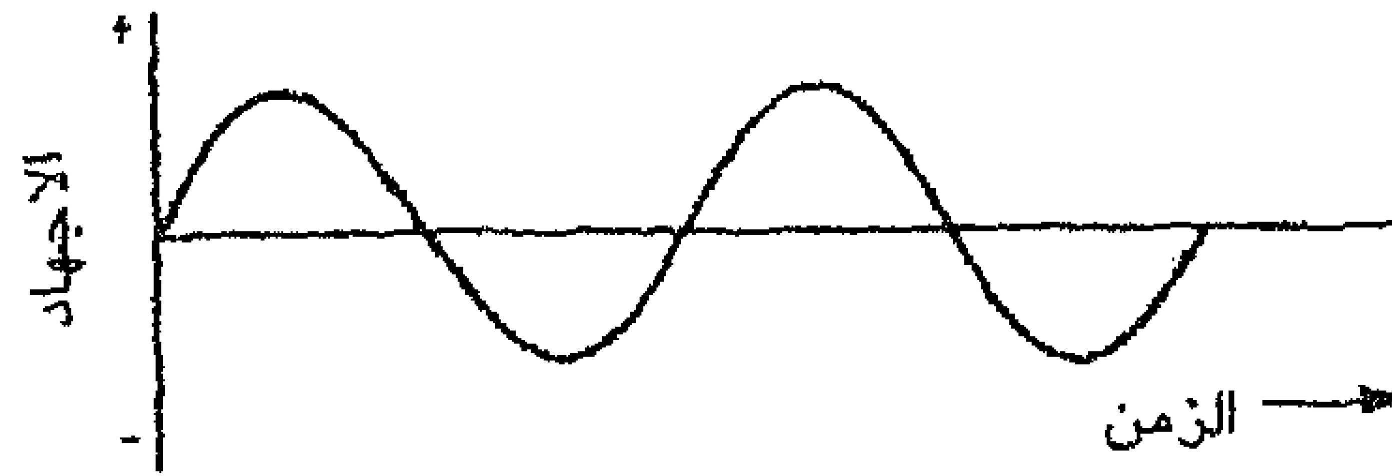
الحصول على بعض المعلومات الاساسية المتعلقة بخواص الكلال من اختبارات مختبرية بسيطة.

ان عمر الكلال او التحمل (endurance) هو عدد دورات الاجهاد حتى الفشل، ويعطى عادة ككسر عشري او عدد صحيح مضروباً بـ $10^6$. وحد الكلال (fatigue limit) هو مقدار الاجهاد الذي ربما تتحمل المادة مالانهاية من دورات الاجهاد عند قيم اقل منه. ولايمكن للعديد من المواد وعند مختلف الاوساط بلوغ حدود كلال واضحة.

ويشتمل اختبار الكلال عادة على استعمال دورة اجهاد متناوبه ذات متوسط اجهاد يبلغ صفراً. وقد تتعرض قطعة الاختبار الى شد او ضغط محوري متناوب، او يتم الاختبار باستخدام آلة اختبار فوهلر (wohler fatigue testing machine) (الشكل 10-28). وربما يتعرض الجزء الى ثني دوراني (rotory bending) . ويتم تحميل قطعة الاختبار ذات مقطع عرضي دائري كعارضة مثبته من طرف واحد (حَيد)(cantilever). وتدار نهاية العارضه باستخدام محرك كهربائي. ويسلط الحمل الساكن (dead loading) على قطعة الاختبار من خلال مدرجه كريات (ball race) وعند دوران قطعة الاختبار فإن هناك تغيراً جيبياً (Sinusoidal) في الاجهاد الشكل (10-29) الذي تُكون أقصى قيمة له عند السطح و صفراً عند المركز. وعند دوران قطعة الاختبار 180 فإن القوى المؤثرة "F" عند نقطة على قطعة الاختبار تنخفض الى الصفر ومن ثم تزداد الى قيمة القوة "F" وباتجاه معاكس، لذلك فإن الاجهاد عندنقطة على سطح قطعة الاختبار سيتغير من الشد الى الصفر ثم الى الانضغاط.



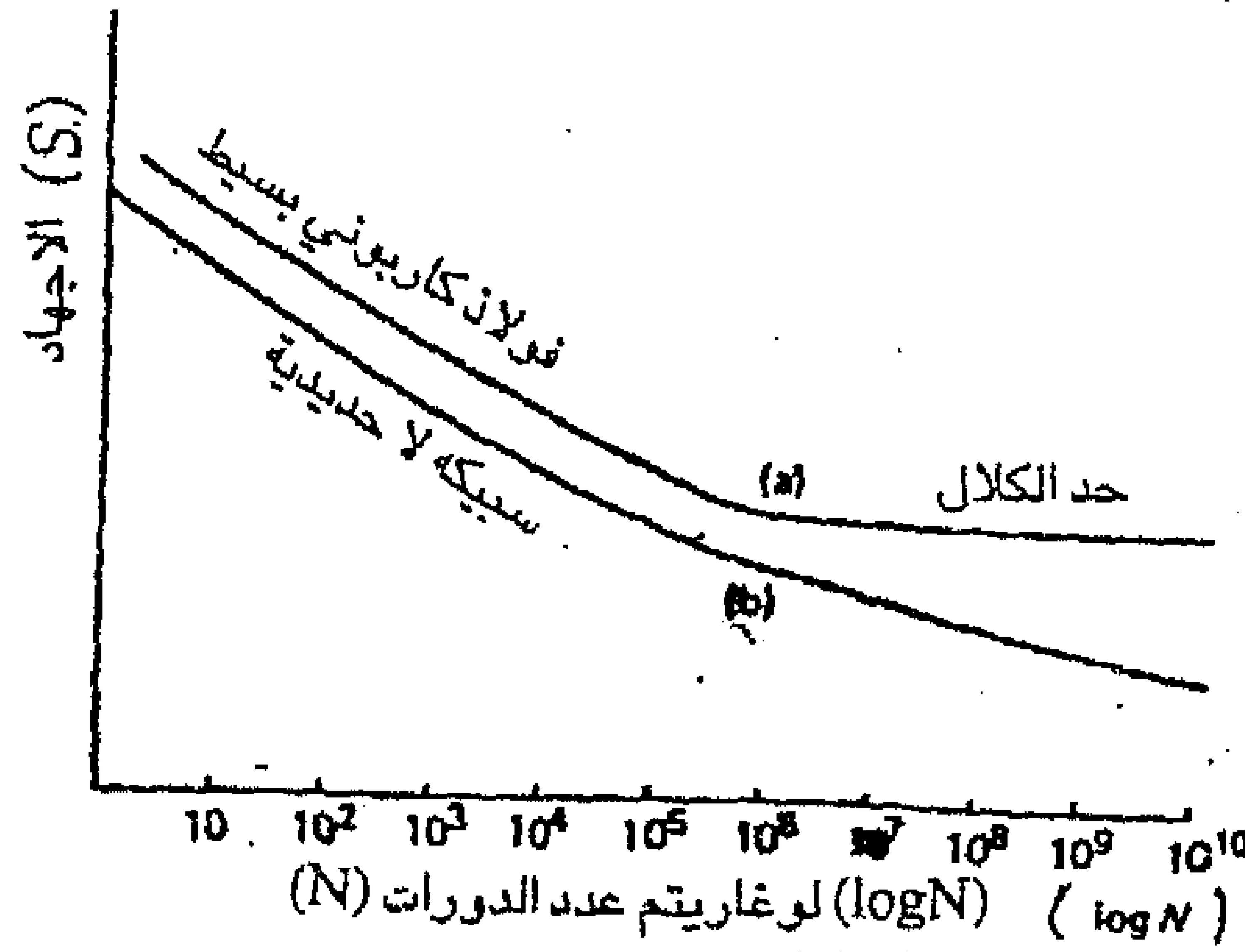

الشكل (10-28) أساس اختبار فوهلر(wohler) الدوراني للكلال.




الشكل (10-29) التغير الجيبي للإجهاد.

ولتعيين حد الكلال، فإن عدداً من قطع الاختبار للماده سيتم اختبارها بهذه الطريقة وعند قيمة مختلفة للقوة "F" لكل عينه، حتى يحدث الفشل او حتى يصل عدد انقلابات الاجهاد من شدي الى انضغاطي وبالعكس الى $2x10^7$ مره. ثم يتم رسم اقصى اجهاد (S) من هذه النتائج مع Log N حيث تمثل "N" عدد مرات الانقلاب . ومن هذا المنحنى يمكن استخراج حد التحمل او حد الكلال وهو أكبر اجهاد يمكن ان يتحمل النموذج عنده مالانهاية من دورات الانقلاب حيث يصبح

المنحنى افقياً عند هذا الاجهاد (الشكل 10-30). ويبدي معظم انواع الفولاذ حد كلال واضح (كما في المنحنى (a) من الشكل 10-30) والذي يبلغ حوالي نصف مقاومة الشد المحدد في اختبار الشد. ولاتظهر العديد من المعادن اللاحديدية حد كلال واضح، اي ان منحنى S-N يميل بالتدرج في الانحناء باتجاه المحور الافقي (كما في المنحنى (b) من الشكل 10-30). ويبلغ معدل الانقلاب الدوري في اختبار الكلال حوالي 120-150 هيرتز (Hz)، وتستخدم احياناً معدلات اعلى لغرض إكمال $10^7$ دوره في عدة ساعات. ولكن تميل هذه التجارب لاعطاء نتائج أعلى لقيم حد الكلال من النتائج التي يتم الحصول عليها من اختبارات ذات تردد واطئ.




الشكل (10-30) منحنيا S/N النموذجيان.

### ٢-٨-١٠ العوامل المؤثرة على مقاومة الكلال:

يتأثر فشل الكلال بالعديد من العوامل الهندسية والميتالورجيه و التي تشمل:

**١- متوسط الاجهاد** mean stress :

تشتمل الاستخدامات الهندسية الرئيسة على متوسط الاجهاد والذي لايساوي صفراً، وهذا مغاير للحالات الموجوده، عادة، في اختبار الكلال وبزيادة متوسط الاجهاد في الشد ينخفض حد الكلال وحد الصمود.

**٢- الانهاء السطحي** surface finish

ان الانهاء السطحي الناعم مهم لتحقيق مقاومة كلال عالية، وعادة تصقل قطعة

اختبار الكلال. وتعطي السطوح المجلخه (ground surfaces) حد كلال منخفض ، حيث تؤدي الخدوش السطحية الى سهولة تكوّن شقوق الكلال مؤدية الى انخفاض كبير في مقاومة الكلال.

**٣- تصميم الجزء** component design

لابد من الاحتياط عند التصميم لتجنب التغيّرات الحاده في المقطع (كالانحناءات الحادة ذات الزوايا الصغيرة) وذلك لعملها الرافع او المركّز للإجهاد والتي تبدأ منها شقوق الكلال. ويجب أن يكون السطح منتظماً دون تغييرات حاده او حزوز. والمواد الاقل مطيلية اكثر حساسية للحزوز السطحية من المواد الاكثر مطيلية. وتزداد حساسية الحز (notch sensitivity) بزيادة مقاومة الشد. لذلك فإن عملية انهاء السطح وتنعيمه مهمة جداً للأجزاء المصنعة من الفولاذ عالي الشد (high tensile steel) .

**٤- معاملة السطح** Surface treatment

بما أن شقوق الكلال تبدأ عادة عند السطح فإن طرائق التصليد السطحي كالكربنه والنترده والتصليد بالليزر وغيرها من الطرائق تؤثر على عمر الكلال. ويرجع تأثير التصليد السطحي الى توليد اجهادات انضغاطية متخلفة في السطح لتحسين عمر الكلال .

**٥- وجود الاكتنافات** Presence of inclusions

قد تعمل الاكتنافات اللامعدنيه عند السطح او بالقرب منه كنقاط لبدء الشقوق ومن ثم تقلل من عمر الكلال . وتتصرف الاكتنافات الصلده بهذه الطريقة ولكن اللينه منهاوالتي تتشوه بسهوله (ككبريتات المنغنيز او الرصاص) فلها تأثير قليل جداً.

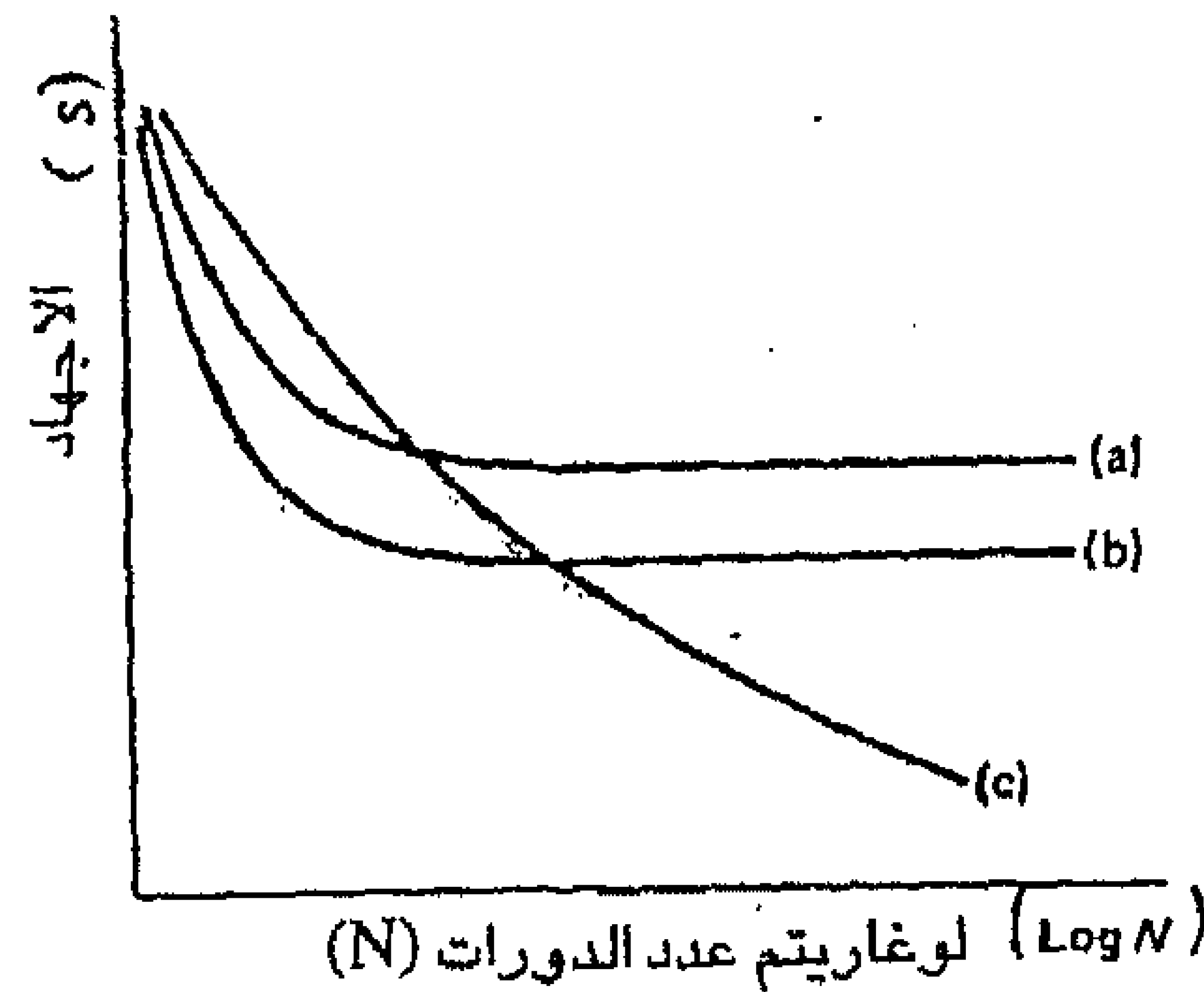
**٦- درجة الحرارة** Temperature

يزيد انخفاض درجة الحرارة عن درجة حرارة المحيط من حد الكلال عادةً، ومن الصعب تعميم تأثير الزيادة في درجة الحرارة لأنه من الممكن حدوث تغييرات في

بنية المادة عند تغيّر درجة الحرارة، مع أن حد الكلال الواضح لايمكن الحصول عليه في العديد من حالات الاختبار عند الدرجات الحرارية العالية.

٧- الوسط (المحيط) Environment

عند وجود وسط أكآل (فاعل)، قد تتكون نقر تآكليه (corrosion pits) صغيرة على السطح وقد تعمل هذه النقر كنقاط لتركيز الاجهاد ومن ثم كنقاط لنشوء شقوق الكلال. ويبين الشكل (10-31)خواص كلال التآكل، منحني (a) فولاذ ذو حد كلال عادي، منحنى (b) لنفس الفولاذ ولكن عرضت قطع الاختبار لجو تآكلي قبل الاختبار. ويلاحظ بأنه مازال بالامكان الحصول على حد كلال واضح ولكن عند اجهاد منخفض (اقل من الاجهاد الاول). منحني (c) تم الحصول عليه لنفس الفولاذ ايضاً إلا أن الاختبار قد تم في جو تآكلي حيث لم يلاحظ حد الكلال ، وقد انخفضت مقاومة الكلال بصوره كبيره.




**الشكل (10-31) تأثير التآكل على خواص الكلال.**

**a- الاختبار في جو عادي.**

**b- عرضت قطعة الاختبار اولاً الى جو تآكلي ثم اختبرت.**

**c- الاختبار في جو تآكلي.**

## ٩-١٠ طرائق فحص أخرى:

### ١-٩-١٠ اختبار الانضغاط compression testing

يمكن اعتبار اختبار الانضغاط اختباراً معاكساً لاختبار الشد اذ ان الحمل المسلط الاحادي المحور(uniaxial load) هو حمل انضغاطي لاشدي . ويستفاد من هذا الاختبار في تقييم المواد الهشة التي غالباً ما تستخدم في حالة الانضغاط لا الشد. ان المواد التي غالباً ما تفحص انضغاطياً هي حديد الزهر والاجزاء المنتجه من مساحيق المعادن (اي باستخدام ميتالورجيا المساحيق)، والعديد من المواد اللامعدنية كالكونكريت والسيراميك والخشب والطابوق.

**وهناك اربعة مشاكل تصاحب الاختبار الانضغاطي:**

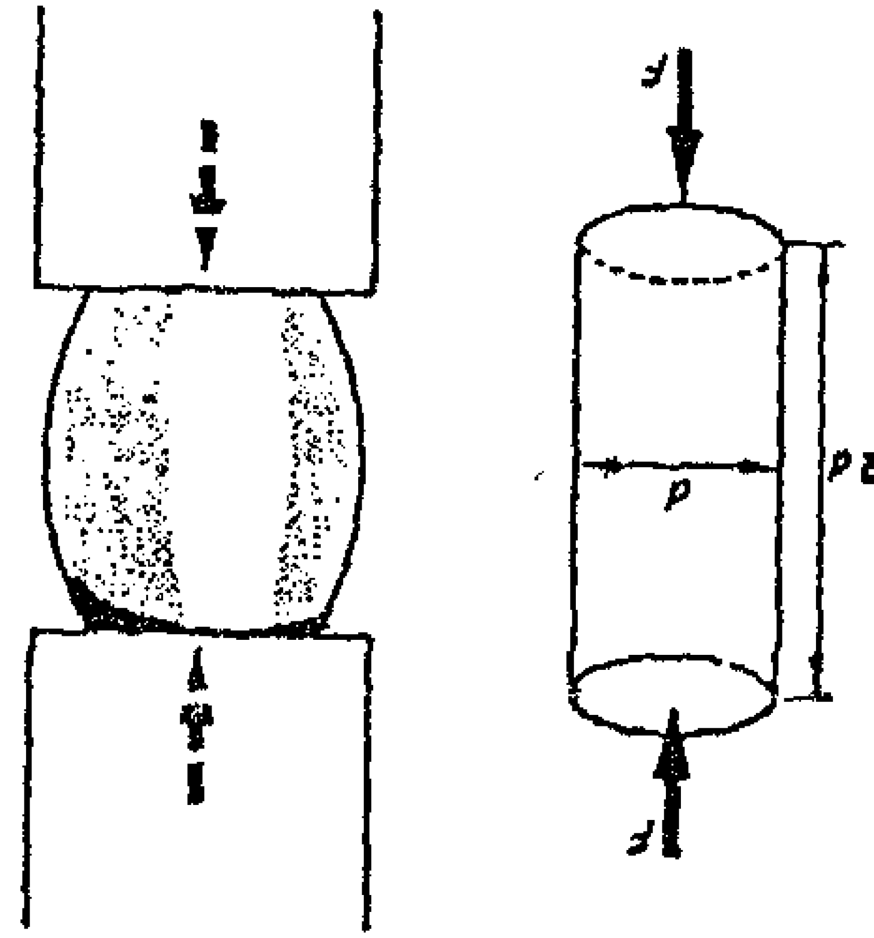
أ- صعوبة تسليط حمل محوري لصعوبة ضبط المركزية (centering) .

ب- محدودية التمدد الجانبي (Lateral expansion) بسبب القوى الاحتكاكية عند السطح البيني للساندات (الضاغطات) ونهايتي العينه والتي تعطي للعينه شكل البرميل (الشكل 10-32).

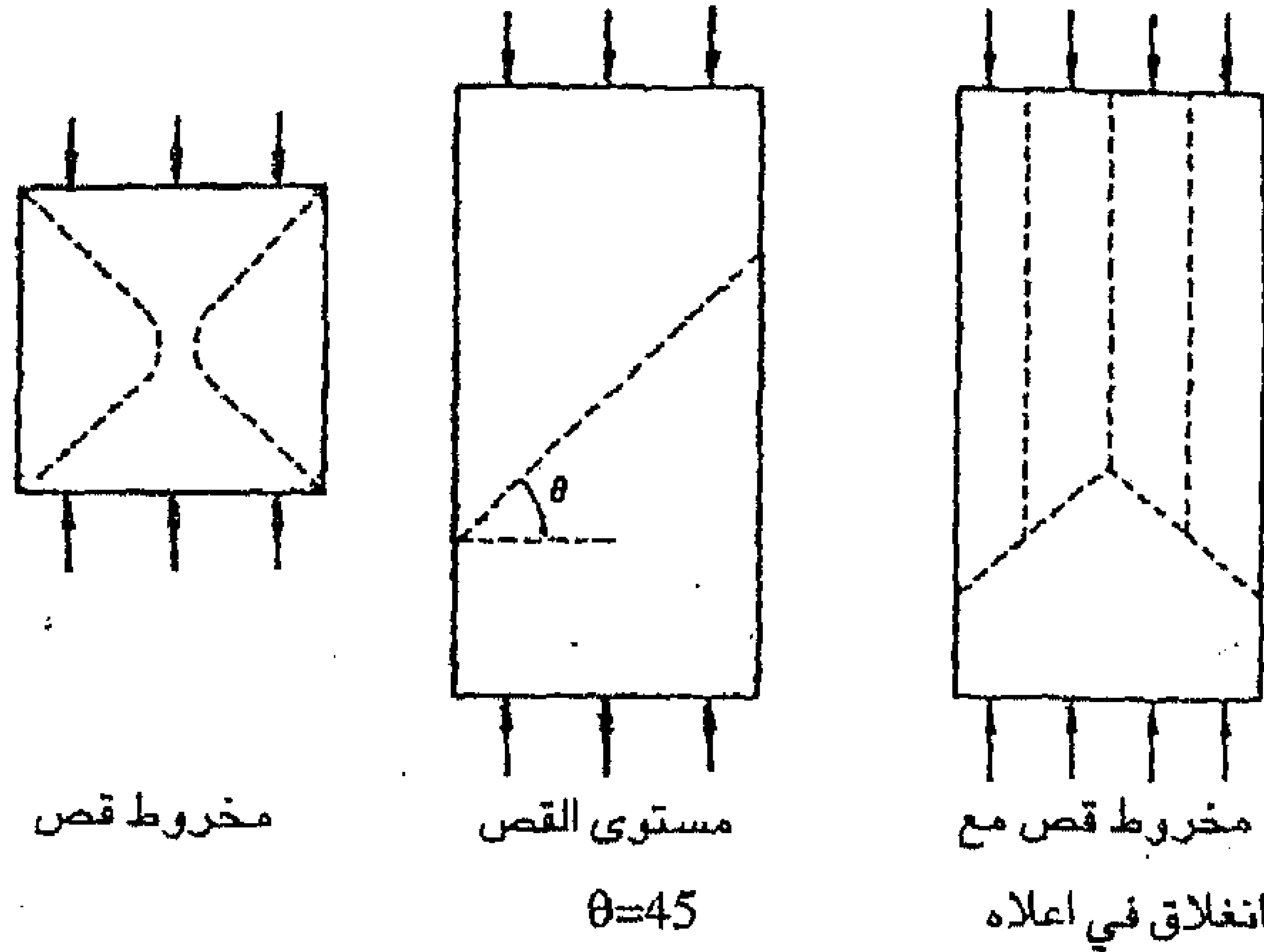
جـ- ميل الصفيحة للتحدب (buckling) تحت الحمل ، ويتم التغلب على هذا النوع من التغيير الانضغاطي وبمقدار كبير باستخدام عينات ذات نسبة طول الى قطر لايتجاوز 1:3 .

د- الحاجة الى عينات بأقطار اكبر من الاقطار المستخدمة في اختبارات الشد وستحتاج هذه العينات الى احمال اكبر.

ان نتائج الاختبار المذكور هي - عادة - لايجاد اجهاد حد التناسب للمواد المطيلية ومقاومة الضغط للمواد الهشة. وتعرّف هذه الخواص بنفس تعريف مصطلحات اختبار الشد. وتفشل المواد الهشة عادة بإحدى الطرائق الثلاثة المبينه في الشكل (10-33).



الشكل (10-32) أخذت عينه الاختبار شكل البرميل في اختبار الانضغاط.




الشكل (10-33) انواع الفشل الانضغاطي في ماده هشة.

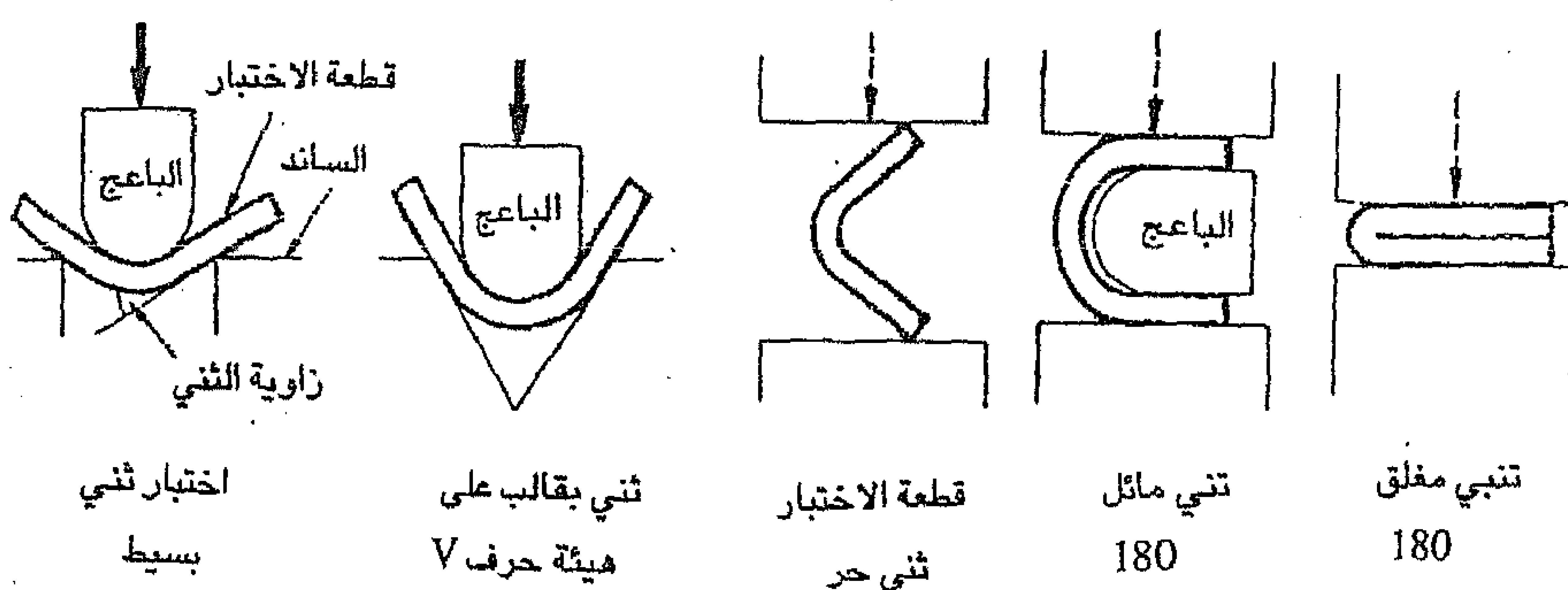
## ١٠-٩-٢ اختبار الثني (الانحناء) Flexural (Bend) testing

يوفر اختبار الثني طريقة اختبار ابسط من اختبار الشد في تعيين مطيلية المواد او ملاءمتها لبعض الاغراض الخاصه. فعلى سبيل المثال تم عمل العديد من الاشكال المختلفة لاختبارات الثني كطريقة سريعه لاختبار نوعية الصفائح او الشرائط او القضبان. وربما تنثني قطعة الاختبار لقطر معين ولزاوية محدده وتقيّم المأده على انها مستوفيه اذا لم يحدث التشقق. وعند اختبار صفيحة او شريط

(strip) لابد من تحديد عرض قطع الاختبار، فالعينه الاكثر عرضاً لها قابلية اعلى على التحمل قبل التشقق.

والطريقة البديله لثني المادة المسطحة (flat material) هي في تثبيت قطعة الاختبار في ملزمه (Vice)، وثني الماده بعد ذلك بزاوية مقدارها °90 ثم يكرر ثنيها بالاتجاه المعاكس وبمقدار °180 حتى يحدث الكسر،يؤخذ عدد الثنيات عند °180 كمقياس للمطيلية. ويستخدم اختبار الثني العكسي (reverse bend test) احياناً لاختبار المواد الرقيقة.

وقد تطرقت المواصفة البريطانية BS 1639 لاختبار الثني . يبين الشكل (10-34) بعض طرائق اختبار الثني الاكثر شيوعاً.

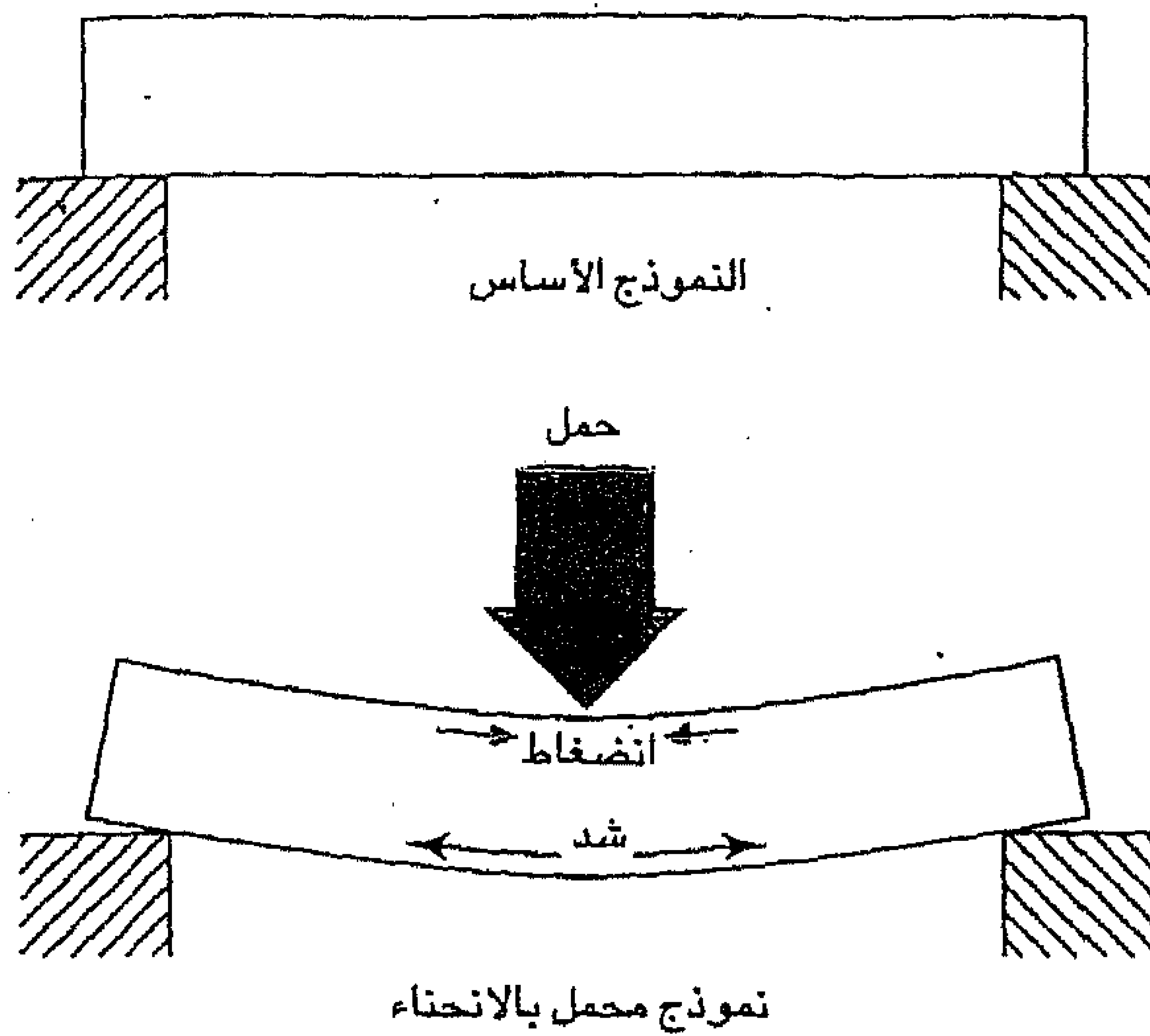



الشكل (10-34) أنواع ختبار الثني.

## مقاومة الانحناء (Flexural Strength) :

تتضمن بصفة عامه شد على أحد جانبي العينه(الماده) وانضغاط على الجانب المقابل كما في الشكل (10-35) .

يظهر هذا النوع من المقاومه في العوارض (beams) والاذرع.




الشكل(10-35) ماده محمله بالانحناء تتعرض الى كل من اجهادي الشد والانضغاط. فالجزء العلوي لهذا النموذج معرض للانضغاط بينما يتعرض الجزء السفلي للمط بالشد.

فعند تسليط الانحناء على جزء ما فسيتولد اجهاد شد على احد جانبيه واجهاد انضغاط على الجانب المقابل . وفي العارضه المتناظره يمكن حساب اعلى اجهاد (Maximum stress) باستخدام العلاقة التالية:

$$\text{(Flexural stress)} = \frac{MC}{I}$$
أجهاد الانحناء.

M = عزم الانحناء (lb) bending moment.

C = المسافة من المحور المتعادل للجزء (in) .

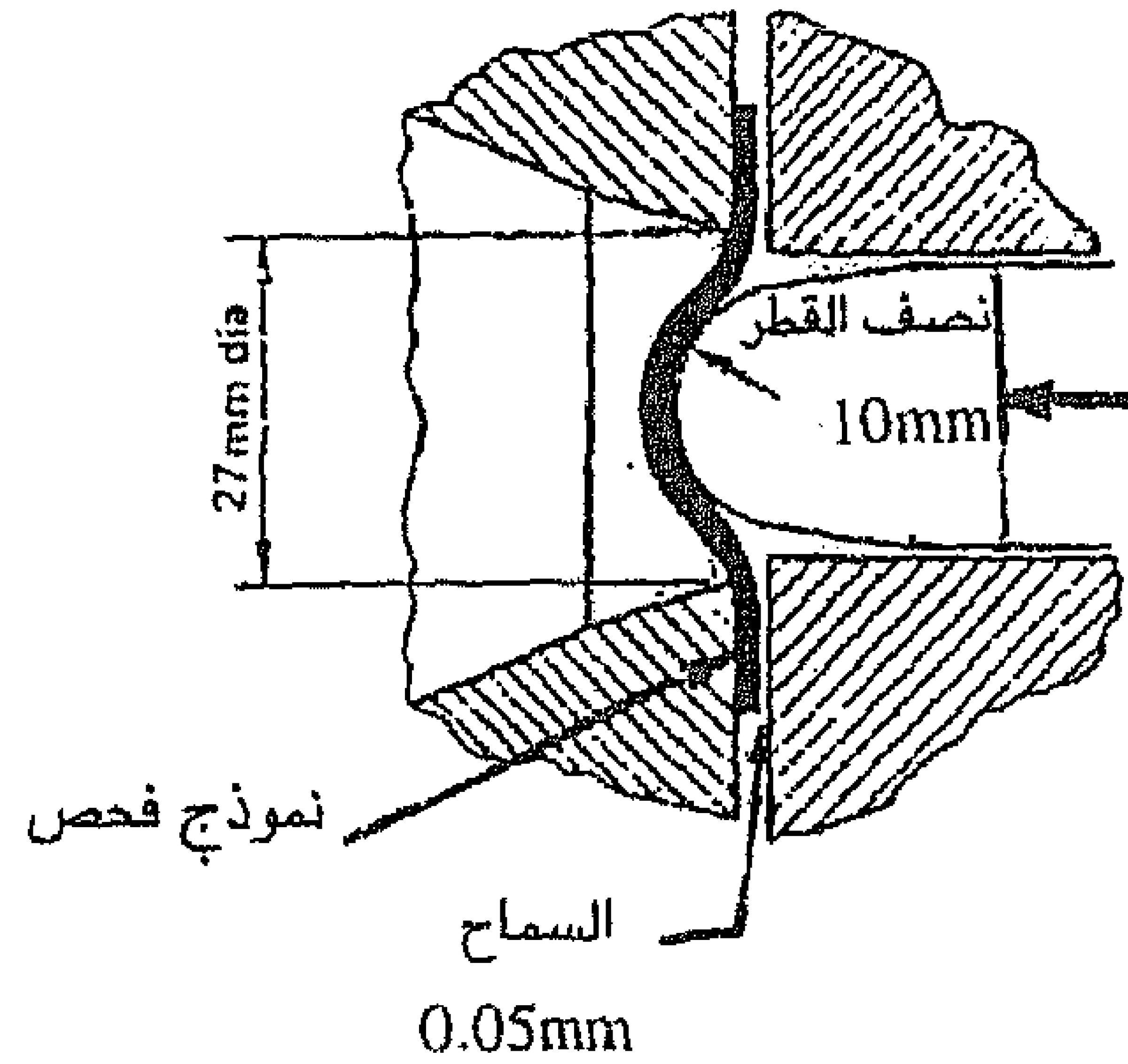
I = عزم القصور الذاتي (moment of inertia) والذي يمكن حسابه كالآتي:

$$I = \frac{\pi D^4}{64}$$

D = قطر الجزء (النموذج) (in)

### ٣-٩-١٠ اختبار اركسن لفحص التقبب Erichsen Cupping test

يتم تثبيت صفيحة الاختبار البالغ مساحتها $180mm^2$ ، عادة ، مابين طوق القالب (die ring) وحامل الغفل (blank holder) كما مبين في الشكل (10-36). تضغط اداة غرز مزيته (Lubricated indenter) على العينه عند مركزها حتى يحدث الفشل بالتشقق عند قبة القدح (Cup dome).




**الشكل (10-36) أساس اختبار اريكسن (Erichsen) للتقبب .**

ويمثل القدح المتكون الذي يعتمد على سمك الصفيحة مقياساً للمطيليه، بينما يعطي الفحص بالنظر للسطح الخارجي للقدح، باستخدام عدسه مكبره ذات قوة تكبير منخفضة. تخميناً للحجم الحبيبي (يعطي الحجم الحبيبي الكبير سطحاً خشناً«تأثير قشرة البرتقال») ويشير ايضاً الى حالة الانهاء السطحي المحتمل . كما ان الفحص بالنظر بوساطة العدسه، لشكل الشق واتجاهه مفيد ايضاً. وتبين وضعية الشق المماسه لقبة القدح اتجاهية الشق، اي ان الخواص المختلفة في الاتجاهات المختلفة تتناسب مع اتجاهية التشغيل ويشير تمركز الشق في القبه لعدم

وجود اتجاهيه سائده، فالشق المتقدم مركزياً عبر القبه يمثل اتجاهية مادة هشة، ويعطي اي تخصر حول الشق دليل على المطيليه.

ان التشويه معقد، في هذا الفحص، اذ انه غالباً مايتكون تشكيل ثنائي المحور مع سحب قليل نتيجة للإنسياب الى الداخل من حافات القالب. ويستخلص تفسير نوعي بعد الاختبار.

يعد اختبار اولسن للتقبب (Olsen cupping test) نوعاً محوّراً لاختبار اريكسن.

### ٤-٩-١٠ اختبار اللّي Torsion test :

قد يستخدم اختبار اللي لتقييم سلوك الماده المعرضه لاجهادات قصيه (shear-ing stresses). اذ تُعرّض قطعة اختبار اسطوانية الشكل الى زوج اللي (twisting couple) ، فتلوى احدى النهايتين بزاوية معينه نسبة الى النهاية الاخرى .

يتم رسم معلومات اختبارات اللي كمنحنى ما بين عزم الدوران ومقدار اللي (torque twiste curve) ويعطي الاختبار العديد من المعلومات منها:

أ- معيار مرونة القص (معيار الجسوء moduls of rigidity )

ب- مقاومة خضوع القص.

جـ- معامل الكسر (مقاومة القص الظاهرية apparent shearing strength).

ويمكن ان يعطي الاختبار قيماً نموذجية اخرى عن لدونة المادة عوضاً عن اختبار الشد والإنضغاط نظراً لتجنب مشاكل التخصر وعدم الاستقرارية والاحتكاك.

وغالباً مايتم تقييم الاسلاك باستخدام اختبار اللي، إذ يثبت طول محدد من المادة في ملزمه من احد طرفيه بينما يكون بالإمكان تدوير الطرف الآخر. ويعطي عدد

الليّـات (number of twists) التي يتحملها الـسلك قبل الكسـر دليلاً على لـدونته.

**مقاومة اللي Torsional strength :**

يمكن ان تعرّف بأنها قابلية الماده لمقاومة القص الدائري الشكل (10-37). يحصل اللي عادة في اجزاء المكائن الدواره. فالقضبان ذات المقاطع الدائرية والتي تحمل طاقه هي أمثلة مألوفة لهذا النوع من المقاومه. فعندما يزداد الاجهاد اكثر فأكثر فإن بلورات المعدن سوف تنزلق على بعضها مما يؤدي الى كسر المقطع العرضي للجزء (القضيب). يحسب اعلى اجهاد ليّ في قضيب ما كالآتي:

(Torsional stress) اجهاد اللي $\approx \frac{TR}{J}$

حيث أن:

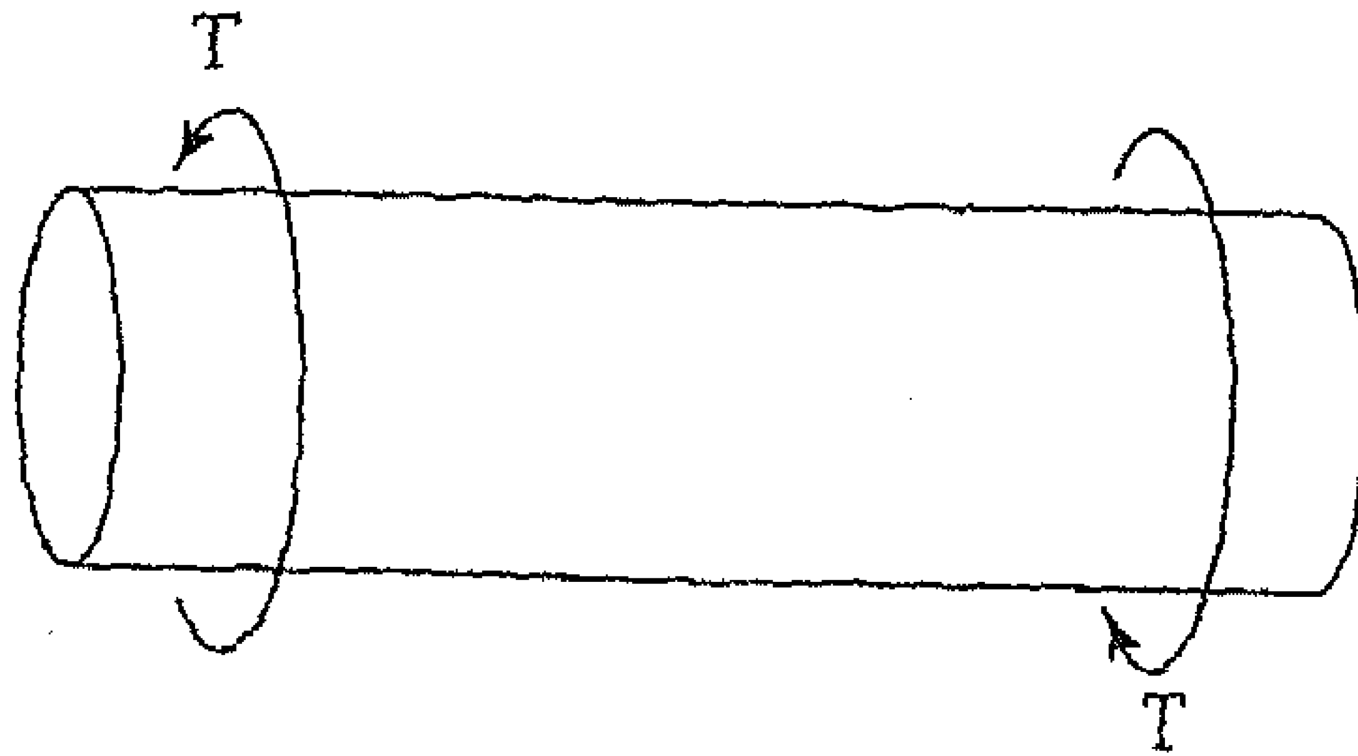
T= العزم المسلط.

R = نصف قطر القضيب.

J = عزم القصور الذاتي القطبي (Polar moment of inertia) والذي يمكن تعيينه باستخدام المعادلة التالية:

$$J = \frac{\pi D^4}{32}$$

D = قطر القضيب.




الشكل(10-37) يحدث اللي عندما تؤدي قوة ما الى دوران جزء من النموذج نسبة للجزء الآخر.

# تمارين الفصل العاشر

١- عرّف مصطلح الصلادة المستخدم في اختبار المواد.

٢- (أ) اذكر ثلاثة اختبارات للصلادة تستخدم عادة لفحص المعادن واعط ميزة ومثلبه لكلٍ منها.

(ب) حدد اي اختبار للصلادة يمكن استخدامه مع المواد غير المتجانسة ذات الصلادة المتوسطة.

٣- اشرح ما المقصود بمايلي، مستعيناً بالرسومات: حد التناسب وحد المرونة واجهاد الخضوع واجهاد الصمود.

٤- اعطى اختبار الشد لعينه اختبار من الفولاذ بقطر 8mm ومدلول مقياس طولي 40mm النتائج التالية:

حمل الخضوع 18.5kN واقصى حمل 22.5kN ومدلول مقياس الطول النهائي =60mm والقطر عند الكسر =6mm .

احسب: أ- مقاومة الخضوع . (ب) مقاومة الشد . (جـ) الاستطالة بالمئة (د) التخصر في المساحة بالمئة (٪) .

٥- تم الحصول على النتائج التالية من اختبار الشد لعينه اختبار من سبيكة المنيوم بقطر 8mm ومدلول مقياس طول 40mm .

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| الحمل (kN) : | 0 | 4 | 6 | 9 | 12 | 14 | 15 | 16 | 17 | 17.5 |
| الاستطالة(mm): | 0 | 0.036 | 0.054 | 0.8 | 0.11 | 0.13 | 0.15 | 0.18 | 0.2 | 0.28 |

ارسم منحناً بيانياً مابين الحمل والاستطالة واستخدمه في ايجاد.

أ- 0.2% اجهاد الصمود.

ب- معامل المرونة.

جـ- اجهاد حد التناسب.

٦- (أ) اذكر اختباري صدمة لقضيب محزوز.

(ب) اذكر سبب تحديد احد الاختبارين المذكورين أعلاه في ايجاد قيمة الصدمة لفولاذ عند $-10\,^{\circ}C$.

(جـ) بيّن بالرسم كيف تصطدم قطعة الاختبار في الاختبارات اعلاه.

٧- (أ) ما المقصود بزحف المواد المعدنية.

(ب) ارسم منحنى زحف نمطي.

(جـ) اذكر مجموعتين من الحالات التي قد يحدث عندها زحف ملحوظ.

٨- (أ) عرّف مصطلح حد الكلال.

(ب) ارسم شكلاً مبسطاً يوضح ماكنة اوهلر لاختبار الكلال.

(جـ) ارسم شكلاً يوضح سمات سطح تم كسره بالكلال.

(د) اذكر اربعة عوامل تؤثر في مقاومة الكلال.

(هـ) قارن بين منحنيات S-N لفولاذ بسيط وسبيكة من الألمنيوم

٩- بيّن اربع مشاكل تواجه الاختبار الانضغاطي وأشر الى كيفية التخلص منها او تقليلها.

١٠- (أ) بيّن المعلومات المفيدة التي قد يوفرها اختبار ثني مادة معدنية.

(ب) ارسم شكلاً توضيحياً يبين اختبار الثني.

١١- اذا كان قطر الجزء (النموذج) هو 0.75 in وكان مقدار العزم المسلط، المسبب للانحناء، عند نقطة الكسر هو 8800 in-Ib فما هو اجهاد الانحناء؟

١٢- (أ) ماهي البيانات المفيدة التي قد يوفرها اختبار اركسن لفحص التقبب .

(ب) ارسم شكلاً توضيحياً يبين اختبار اركسن لفحص التقبب.

١٣- اذا كان العزم المسلط ، المسبب للّيّ، هو 555 in . lb وكان قطر القضيب 0.375 in فأحسب اجهاد اللّي .

# الفصل الحادي عشر

## تقنيات الفراغ Vacuum Technology

### ١-١١ المقدمة:

من المعلوم ان المادة تتألف من ذرات او جزيئات دائمة الحركة، وبوساطة هذه الحركة يمكن تفسير الكثير من خواص المادة الفيزياوية.

ويعود السبب في اختلاف حالات الماده (صلبه او سائلة او غازية) حسب النظرية الحركية للماده الى اختلاف درجة الحرية (degree of freedom) للجزيئات المكونه لها. وبناءً على ذلك تكون جزيئات (او ذرات) المادة الصلبة متراصة ومترابطة فيما بينها بقوة تمنع حركتها ماعدا الحركة الاهتزازية لكل جزيئة او ذره حول موضعها الثابت.

وعندما يسخن الجسم الصلب تزداد اهتزازات جزيئاته حتى تصل الى حد التغلب على الطاقه الرابطه بينها ومن ثم ينتقل الجسم الى الحاله السائلة.

وإذا ما سخنت المادة اكثر فأكثر،فإنها ستتغلب كلية على القوة الرابطة بين جزيئاتها، بعد زيادة طاقتهاالحركية، حيث تتحول المادة الى الحالة الغازية. وعند هذه الحالة لن تستمر الجزيئات في الاهتزاز وانما تصبح غير مرتبطة ببعضها اي تكون حرة الحركة تماماً.

### ٢-١١ الضغط:

تفترض النظرية الحركية للغازات، عند وجود الغاز في وعاء مغلق، ان تصادم الجزيئات، التي لها كتلة معينه، يكون مرناً مع جدران الوعاء الحاوي الملساء. ان

مجموع القوى الناتجة من تصادم الجزيئات مع جدران الوعاء هو الذي يسبب الضغط. حيث يُعرّف الضغط (P) بأنه القوة المسلطة على وحدة المساحة. ويمكن اشتقاق المعادلة الآتية عند استخدام بعض الفرضيات البسيطة

$$P=\frac{1}{3}nm\upsilon^2 \qquad ............(1-11)$$

حيث تمثل $\upsilon$ معدل سرعة الجزيئه

و $m$ كتلة الجزيئه.

و $n$ العدد الكلي للجزيئات في وحدة الحجم

و$P$ ضغط الغاز

يمكن كتابة المعادلة اعلاه كالآتي:

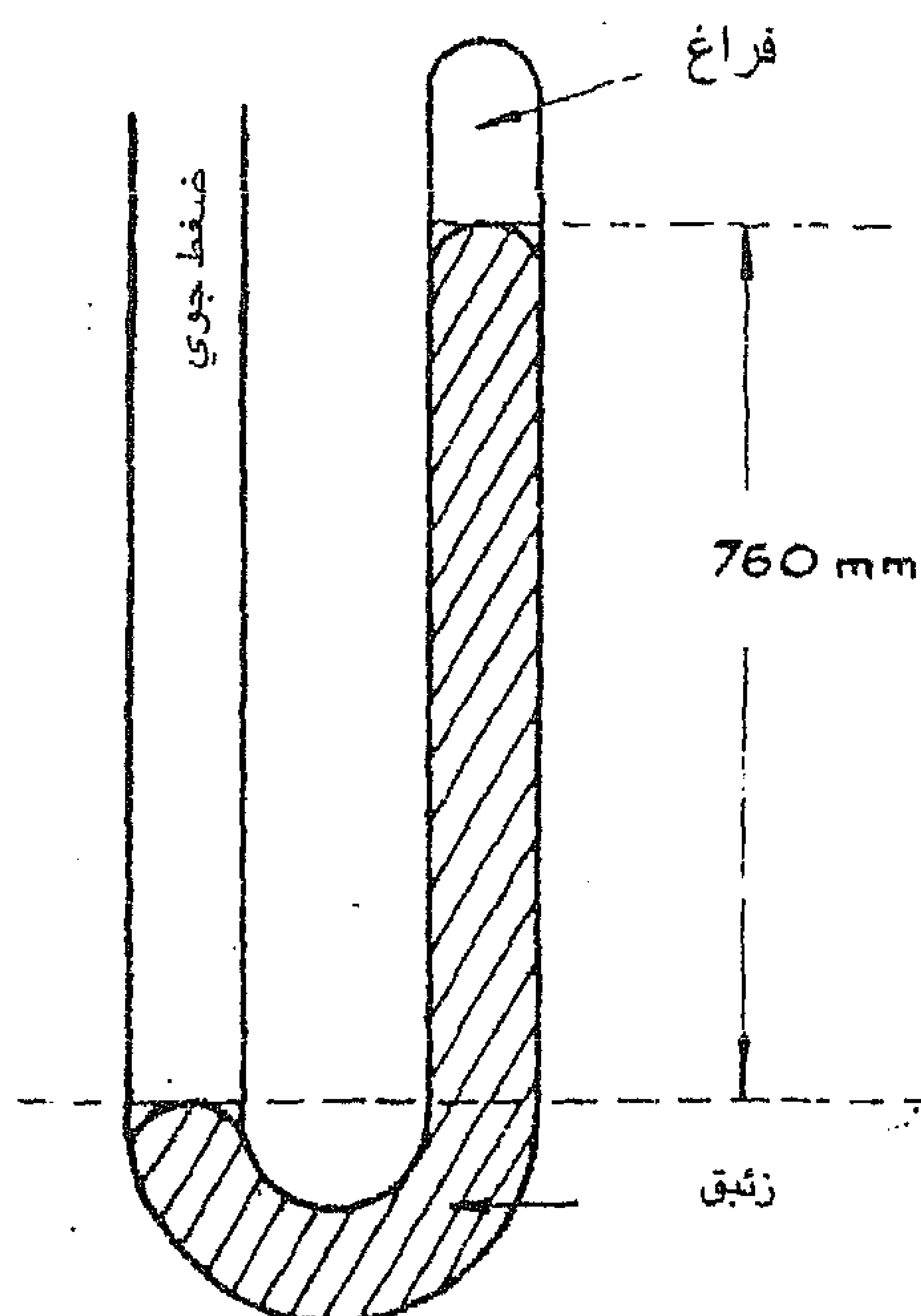
$$P=\frac{2}{3}n(\frac{1}{2}m\upsilon^2) \qquad ..........(2-11)$$

حيث ان $\frac{1}{2}m\upsilon^2$ تمثل متوسط الطاقة الحركية للجزيئه الواحدة. والمقدار $n(\frac{1}{2}m\upsilon^2)$ يمثل متوسط الطاقة الحركية لجميع الجزيئات في وحدة الحجم وعليه فالضغط = $\frac{2}{3}$ (متوسط الطاقة الحركية للجزيئات في وحدة الحجم).

من المعلوم ان جميع الاجسام على سطح الكره الارضيه تقع تحت تأثير وزن الهواء الكائن فوقها، وهذا ما يدعى بالضغط الجوي(atmospheric pressure) . يتغير ضغط الهواء عند تغيّر كثافته. يدعى الضغط داخل وعاء يحتوي على غاز او بخار بالفراغ (vacuum) عندما يكون اقل من الضغط الجوي. للفراغ في العصر الحديث أهمية كبيره في الكثير من التطبيقات الهندسية والصناعية والبحوث.

والطريقة البسيطة لقياس الفراغ هي استخدام انبوبه زجاجية على شكل حرف (U) تكون مملوءة بالزئبق الشكل (1-11). يتم غلق احد طرفيه بعد ازالة الهواء منه. يضغط الهواء الخارجي الزئبق الى الأسفل عند الطرف المفتوح للأنبوبة فينساب

الزئبق لكي يتم الاتزان بين وزن عمود الزئبق في الطرف المغلق مع القوة التي يسلطها الضغط الجوي على الطرف المفتوح. يعتمد الضغط على ارتفاع عمود الزئبق فقط وليس له علاقة بقطر الانبوبة الزجاجية او كمية الزئبق . يفضل دائماً استخدام الزئبق لانه يعطي ارتفاعاً مناسباً.




**الشكل** (1-11) **مضغاط انبوبي زئبقي بسيط** (Simple mercury manometer)

## ٣-١١ وحدات الضغط:

تم استخدام مليمتر من الزئبق كوحدة لقياس الضغط . وهو عباره عن الضغط الذي يسلطه عمود من الزئبق ارتفاعه مليمتر واحد. أصبحت هذه الوحده فيما بعد وحده قياسية تسمى تور (torr) اي أن 1 ملم زئبق = 1 تور .

والشائع في تقنية الفراغ هوتقسيم الضغط الاقل من الضغط الجوي (760 torr) الى مجاميع مختلفة المديات هي:

١– الفراغ الأولي، ويتراوح بين 760 الى 1 تور .

٢– الفراغ المتوسط ، ويتراوح بين 1 الى $10^{-3}$ تور.

٣– الفراغ العالي، ويتراوح بين $10^{-3}$ الى $10^{-7}$تور .

٤– الفراغ العالي جداً اوالاعلى وهو دون $10^{-7}$ تور.

وقد قدّر عدد جزيئات الهواء في كل سنتمتر مكعب واحد ولكل ضغط كالآتي:

| عدد الجزيئات لكل $1cm^3$ | الضغط/torr(تور) |
|---|---|
| $10^{16}$ - $10^{19}$ | 1 - 760 |
| $10^{13}$ - $10^{16}$ | $10^{-3}$ - 1 |
| $10^{10}$ - $10^{13}$ | $10^{-6}$ - $10^{-3}$ |
| $10^{5}$ - $10^{10}$ | $10^{-11}$ - $10^{-6}$ |

## ٤–١١ قياس الفراغ:

تستخدم بعض الخواص الفيزياوية لقياس الضغوط القليلة ،علماً بأن قياس الضغوط القليلة عملية صعبة للغاية . وكما تم ذكره آنفاً، فإن الضغط يتناسب مع ($nm\upsilon^2$) وعليه فإن مقاييس الضغط تقيس الضغط بدلالة كل من n و m و $\upsilon^2$ .

ويمكن تصنيف المقاييس الى عدة مجاميع:

### أ– المقاييس الهيدروستاتيه: Hydrostatic gauges

وتمتاز هذه المجموعه بتسجيلها الضغط الحقيقي الذي يسلطه الغاز،وتشمل المانوميتر (manometer) ومقياس بوردن (Bourden gauge) ومقياس مكلاود (Mecleod gauge) .

**ب- مقاييس الطاقة الحرارية: (Thermal energy gauges)**

وتعتمد هذه المجموعة في قياس الضغط على الموصليه الحراريه للغاز، وتشمل مقياس المزدوج الحراري ومقياس بيراني (Pirani gauge) .

**جـ- مقاييس الطاقة الكهربائية Electric energy gauges:**

وتعتمد هذه التقنية على تأين الغاز وذلك بقياس التيار الكلي للأيونات، وتشمل هذه المجموعة المقياس الايوني للمهبط الساخن (Hot-cathode ionization gauge) ومقياس بننك الايوني (Penning Ion gauge) .

**د- مقاييس التفريغ الكهربائي Electric discharge gauges :**

يعتمد التفريغ الكهربائي في الغاز على بعض العوامل ، وأحد هذه العوامل هو ضغط الغاز الموجود في حجرة الفراغ.لذلك يمكن قياس ضغط الغاز من خلال التفريغ الكهربائي المتولد فيه.

## ٥-١١ توليد الفراغ Creation of vacuum :

الواقع لم يتم لحد الآن اكتشاف مضخة لتفريغ وعاء ما ابتداء من الضغط الجوي حتى الضغوط القليلة التي نحتاجها في الوقت الحاضر (اي حوالي $10^{-7}$ تور او أقل)، وهذه من المشاكل الاساسية في تقنية الفراغ.

وبالرغم من تعدد قواعد اشتغال المضخات الفراغية لكنها تنصب جميعاً في مبدأ واحد هو تقليل الضغطP ، وذلك بتقليل الطرف الايمن من المعادله (3-11) .

$$PV = \frac{1}{3} Nm\upsilon^2 \qquad \text{........ (3-11)}$$

V حجم الغاز وأن nV= N ، وتمثل عدد جزيئات الغاز الموجود في وحدة الحجم. وهذا يعني تقليل عدد الجزيئات او تقليل طاقتها الحركية من خلال تقليل السرعة. ويتم ذلك بخفض درجة حرارتها او بطرد جزيئات الابخره الموجوده.

هناك عدد من المضخات (Pumps) الممكن استخدامها في أجهزة الفراغ الا أن المستخدم في الغالب هي:

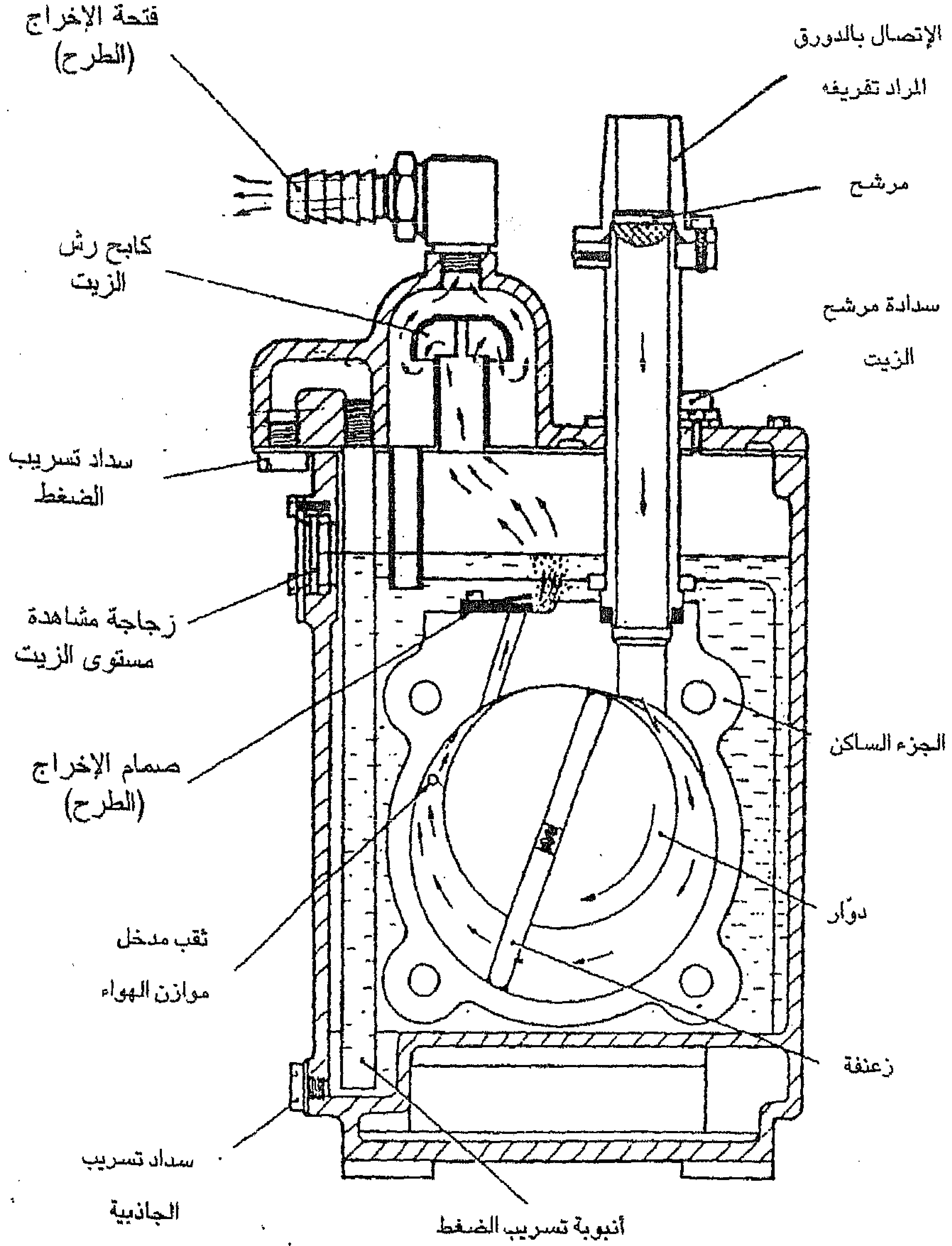
أ- مضخة الفراغ الدواره Rotary vacuum pump :

يبين الشكل (2-11) مضخة فراغ دوّاره نموذجية. يدخل الهواء عند اشتغالها عن طريق وصله الى داخل الحجم الذي يولده الدوار اللامركزي والمثبت على الجزء الثابت، يكبس هذا الحجم بوساطة الريشتان المركبتان على الدوار ويضغط الهواء المقتنص الى ضغط اكبر من الضغط الجوي وهذا يسبب فتح صمام الخروج لطرد الهواء المقتنص نحو الحمام الزيتي الذي يمثل عازل عن الجو.

لاتستطيع المضخات الكبيره من هذا النوع الوصول الى فراغ اكثر من حوالي $5x10^{-3}$ torr وذلك نتيجة للتسرب الخلفي للهواء من خلال الجزءالثابت ومقعد الدوار بالإضافة الى التفريغ الاضافي (out gassing) لزيت التفريغ. وللتغلب على هذه المشكلة تضاف حجره ثانية على التوالي، وعندئذ تدعى المضخة بذات المرحلتين بدلاً من المضخة ذات المرحلة الواحده. توضع المرحلة الثانية خلف المرحلة الاولى وتتصل معها بوساطة فتحة انتقال داخليه.

عند الضغوط القليله، سوف يقل اختلاف الضغط بين الجزء الثابت ومركز الدوار في مرحلة الفراغ العالي، وغالباً ما يتعدى مرحلة التسرب الخلفي. ويغذي زيت التزييت مرحلة الفراغ العالي من المرحلة الاولى والذي يكون خالي من الغاز (de-gassed) تقريباً قبل دخوله مرحلة الفراغ العالي.

تمتاز هذه الطريقة بكفاءتها في التفريغ عند تعاملها مع الغازات الاعتياديه، لكنها تعاني صعوبة عند تعاملها مع الابخره المتكاثفة كبخار الماء الذي يتواجد دائماً في الجهاز المراد تفريغه . لذلك ادخلت تطويرات على هذه المضخة تعتمد على أكثر من تقنيه للتغلب على هذه المشكلة.




**الشكل (2-11) مضخة تفريغ دوّاره نموذجية**

.(Rotary vacuum pump)

**ب- المضخات البخارية Vapour pumps:**

تستخدم المضخات الميكانيكية الدواره في الفراغ الأولي الى المتوسط ، ولاتكون صالحه للإستخدام عندما يتطلب الامر ضغطاً اقل من $10^{-3}$ torr . والمضخات الشائعة الاستخدام في مدى الفراغ العالي هي المضخات البخاريه والتي تدعى عادةً المضخات الانتشارية (Diffusion pumps) .

تصنف هذه المضخات الى ثلاثة انواع هي:

١- المضخات الانتشارية وتستخدم للتفريغ من $10^{-3}$ الى $10^{-7}$ torr .

٢- مضخات القذف المنشطة وتستخدم للتفريغ من $10^{-1}$ الى $10^{-2}$ torr .

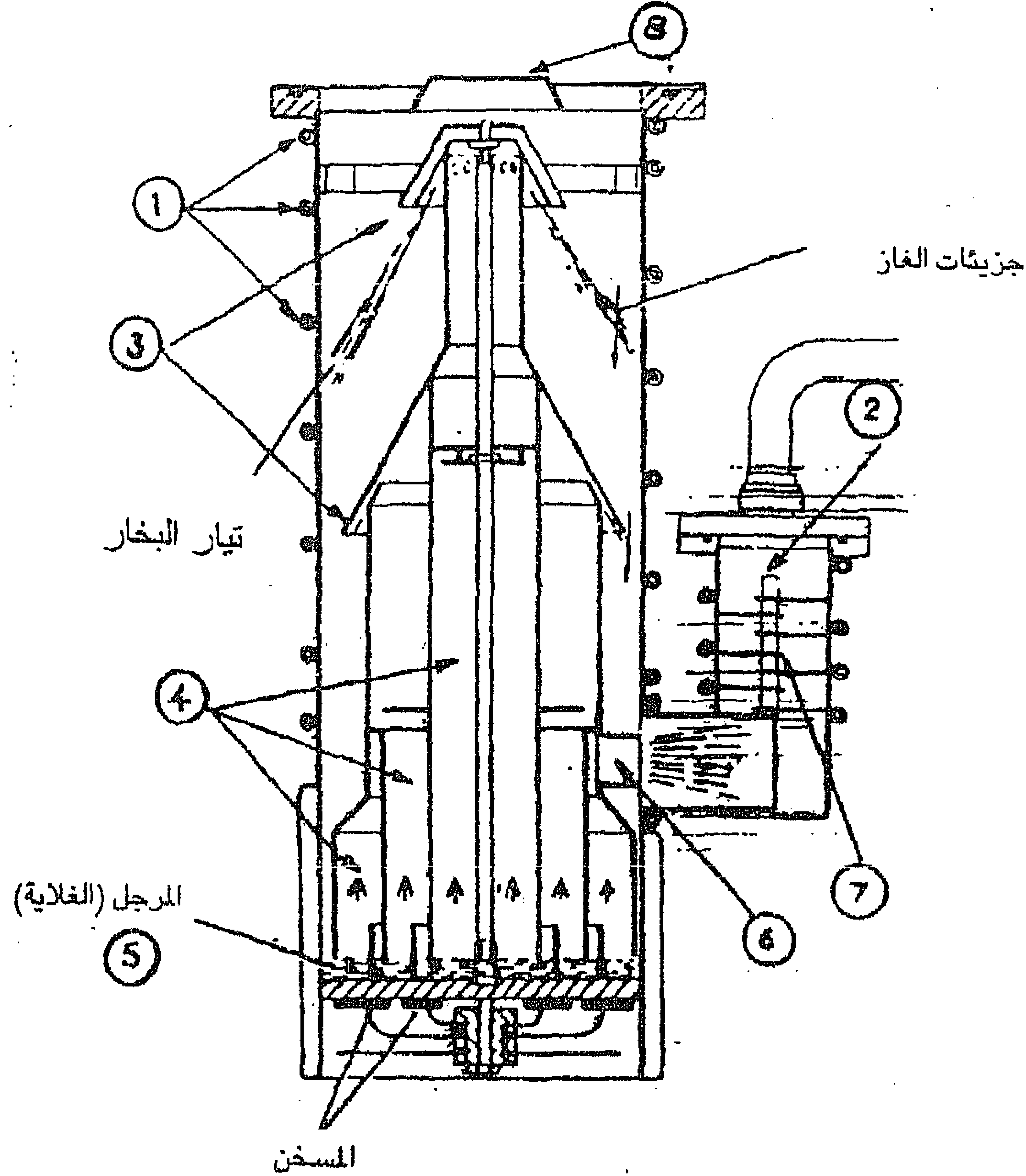
٣- المضخات الانتشارية المنشطة وتستخدم لتعزيز المضخة الانتشارية بهدف زيادة مداها.

ان أساس عمل جميع المضخات البخارية واحد، حيث تُجذف (تجرف) الغازات المراد ازالتها وذلك ببثق بخار الزيت او الزئبق في الحجرة حيثما تنتشر الغازات ثم الى البثق الخارجي.

**عمل المضخة الانتشارية الزيتيه:**

توضع كمية من الزيت في قاعدة المضخة حيث يوجد المسخن. يتم تسخين وغليان الزيت بوساطة هذا المسخن (5)، كما مبين في الشكل (11-3) . يندفع بخار الزيت نحوالأعلى من خلال مداخن البثق (4) ومن ثم يضطر الى الخروج من فتحات البثق (3) بسرعة عاليه تفوق سرعة الصوت . تتكاثف جزيئات الزيت على جدران المضخة بسبب التبريد الناتج من ماء التبريد المار في الانابيب (1) ومن ثم تعود ثانية الى المرجل (مستودع التسخين) ليعاد تبخيرها مرة ثانية. تضطر جزيئات الغاز الموجوده فوق الوعاء الى الانبثاق والدخول الى المنطقة الأكثر ضغطاً والموجودة في أسفل المضخة. وهنا يكون الضغط كبيراً بحيث تستطيع المضخة الدواره من سحب كميات الجزيئات المتراكمة بنجاح من خلال الوصله الموجوده في مقدمة الفراغ (2) .

يستطيع الباثق ضغط الغاز المفرغ من منطقة الضغط القليل جداً إلى منطقة الضغط العالي جداً (بحدود عشرات المليمترات زئبق). فعلى سبيل المثال عندما يكون الضغط في المقدمة $10^{-6}$ تور فهذا يعني ان نسبة الضغط ستكون $\frac{1}{100000}$ .




الشكل (3-11) رسم تخطيطي لمضخة انتشاريه (diffusion pump).

وتتصل بوصلة المقدمه كوابح مبرده (cooled baffles) تقوم بتكثيف بخار الزيت الذي تقذفه المضخة، وبعد ذلك يسمح له بالتصريف الخلفي الى المضخة . سوف يفقد مقدار كبير من الزيت الى الخط الخلفي اذا لم تتحقق هذه العملية وبذلك ستحتاج المضخة الى زيت اضافي.

**النقاط المهمة في اشتغال المضخات الانتشارية:**

ان الفكرة الأساسية في اشتغال المضخات هي تسخين الزيت الى درجة الغليان ومن ثم حصول التبخر. ان هذه المضخة لاتستطيع الاشتغال عند الضغط الجوي لان ذلك يؤدي الى تحطيم الزيت. وكذلك لايمكن للمضخة البدء بالإشتغال في الضغط الجوي، بل تحتاج الى تفريغ مسبق مع الجهاز الى درجة معينه من الفراغ بوساطة مضخات أخرى (كالمضخة الميكانيكية الدواره) ومن ثم يمكن تشغيلها.

تحتاج المضخة ايضاً الى تبريد وذلك ليسهل تكثيف بخار الزيت على جدران المضخة، ومن ثم سحبه الى المرجل واعادة تبخيره. يتم التبريد اما بوساطة الملفات اوالانابيب التي تلحم بجدران المضخة او بوساطة الغطاء المائي.

اما الهواء المزاح من الجهاز والمتجه نحو قعر المضخة والواقع تحت ضغط مخلخل فيجب تفريغه الى الخارج . وبذلك تحتاج المضخة الانتشارية الى مضخة أخرى تساندها وتوضع خلفها وذلك لإزالة الغازات التي لها ضغوط أكثر من $10^{-2}$ تور الى الضغط الجوي. ومن هنا جاءت ضرورة استخدام المضخة الدواره.

تعتمد خواص الاشتغال الاساسية لاية مضخة انتشارية على مايلي:

١- كمية الطاقة الحرارية المزوده للمرجل.

٢- كثافة وضغط الزيت المستخدم في المضخة بالاضافة الى كميته.

٣- تصميم مجموعه القذف.

٤- مراحل تبريد جدران المضخة.

٥- القطر الداخلي وسعة المضخة.

وسوف نقتصر بالحديث هنا على ماذكرنا من أنواع المضخات وسوف نترك الحديث عن مضخات الفراغ العالي اي الاعلى من $10^{-7}$ تور الى المصادر المتخصصة وذلك لعدم صلتها بمفردات هذا الكتاب.

## ٦-١١ اجهزة التفريغ Vacuum Systems :

يمكن تقسيم أجهزة التفريغ الى قسمين:

١- أجهزة سكونيه Static Systems:

٢- أجهزة حركية (دينميه) Dynamic Systems .

يكون الوعاء السكوني خالياً من الثغرات ومفرغاً ويتم طرد الغازات منه تدريجياً بوساطة التسخين او القنص، ثم يعزل عن جهاز التفريغ. يتم حفظ مثل هذه الاجهزة بحالة من النظافة التامه. لكي تحافظ على الفراغ لأعلى درجة ممكنه. تصنع هذه الاوعية من مواد غير مساميه(nonporous) حتى لايتدهور الفراغ الذي قد يحصل نتيجة للمج (desorption) . ولذا تصنع هذه الاوعية من الزجاج عادة ومن ثم تغلق (تلحم) ومن الامثلة على ذلك انابيب الاشعة السينية وصمامات أشعة المهبط والصمامات الراديويه.

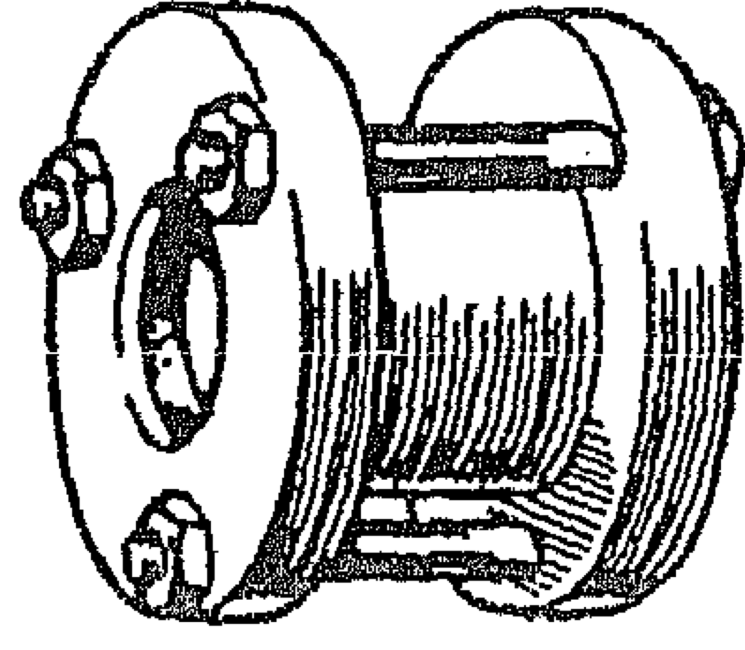
أما الاجهزة الحركية (الدينمية) فيكون التفريغ فيها مستمراً وذلك بسبب تسرب الغاز سواء من جدران الوعاء او وجود ثغر اوعدة ثغور صغيرة جداً في مناطق الاتصال. يعتمد مقدار الفراغ المراد تحقيقه على حجم الثغر الموجود وعلى سرعة التفريغ المتاحة. تكون الاجهزة الموجودة في المختبرات او المنشآت الصناعية من النوع الحركي وهو الاكثر أهمية في تقنيات الفراغ.

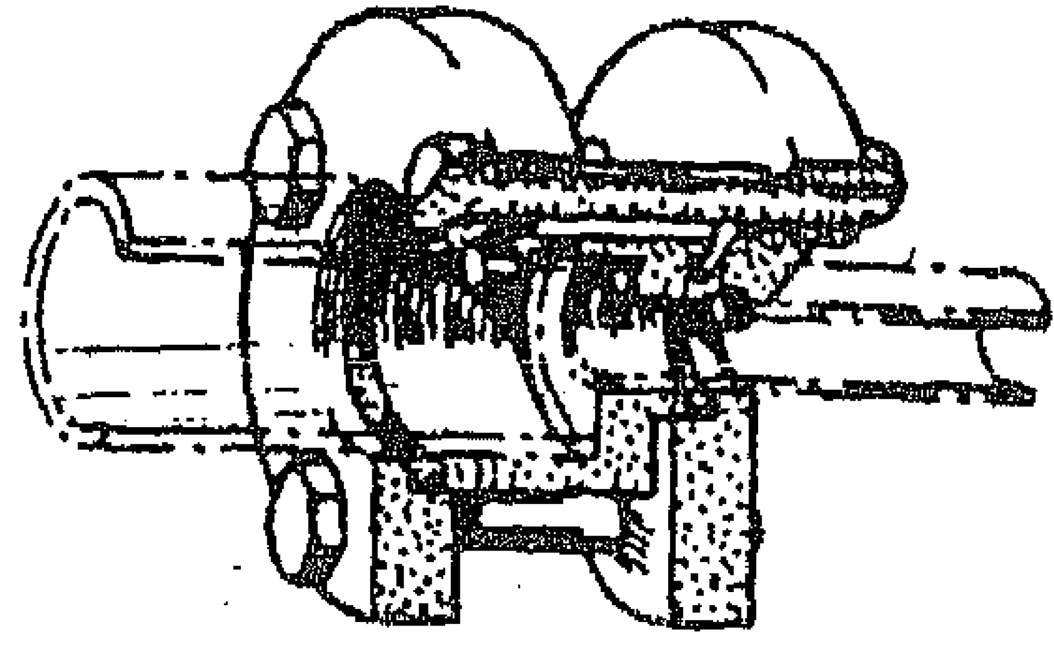
لقد سبق ذكر ان الاجهزة البسيطة المستخدمة في توليد الفراغ تتكون من المضخة الميكانيكية الدواره والمضخة الانتشارية او المضخة الايونية (لم يتم شرحها هنا) . وأنه تتوفر أنواع من مقاييس الضغط يمكن استخدامها في هذه الاجهزة. تصنع معظم اجزاء اجهزة الفراغ من المعادن مثل الوصلات النحاسية والاوعية الفولاذيه او النحاسية او من النحاس الاصفر (brass) .تبنى اجهزة الفراغ بدقه متناهية للحصول على فراغ فعّال غالباً ما يكون ضرورياً في الكثير من التطبيقات.

يجب عمل جميع الوصلات والتراكيب بحيث لاتسمح بوجود الثغرات، لان تحقيق الفراغ النهائى يعتمد على مجموع الثغور الصغيره الموجوده. اضافة الى وجوب تصميم جميع مقاييس الفراغ وصماماته بصوره محكمة لتحقيق الفراغ المطلوب. يعتمد الفراغ النهائي الممكن بلوغه، اضافة الى ما تقدم، على سرعة التفريغ في الانابيب والتراكيب الاخرى التي يتكون منها الجهاز.

لقد صممت في السنوات الاخيره عدداً من صمامات الفراغ و التراكيب القابلة للتفكيك، وتعتمد غالبيتها على السد المحكم وذلك باستخدام طوق داخلي، حشيه، (gasket) مصنوع من مطاط او من معادن طريه. لقد برهنت التراكيب القابله للتفكيك نجاحها وخاصة تلك التي يستخدم فيها المطاط او مطاط النتريل(nitrile). وحيث ان المواد كالمطاط ومطاط النتريل لها ضغوط بخارية محسوسة فقد تسبب مشكلة خصوصاً عند درجات الحرارة العالية لذا تم تطوير مواد جديدة في الوقت الحاضر لغرض السد المحكم الحلقي (O-ring) كالفيتون (Viton) ولدائن الفلور (fluorinated). ويستخدم في الفراغ العالي طوق داخلي مصنوع من النحاس او الانديوم او القصدير خصوصاً اذا تطلب الامر رفع درجة الحرارة للحصول على تفريغ اعلى .

يبين الشكل (11-4) اشكال مختلفة من الوصلات القابلة للتفكيك والاستخدام المتكرر. ويجب الاشارة الى ان الصمام الكابح (baffle valve) المستخدم عند مدخل المضخة الانتشارية يكون ذو قطر اكبر او مساوٍ الى قطر المضخة لضمان بقاء سرعة التفريغ اعظم مايمكن. كما يجب ان تكون جميع التراكيب والانابيب المستخدمة في اجهزة الفراغ نظيفة وخالية من الزيوت والدهون.

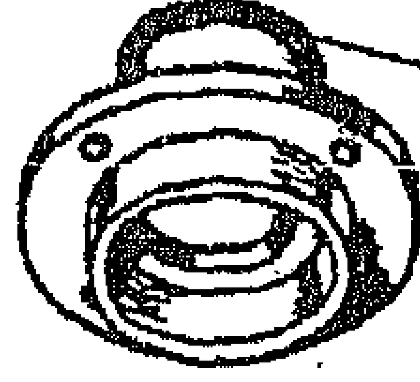


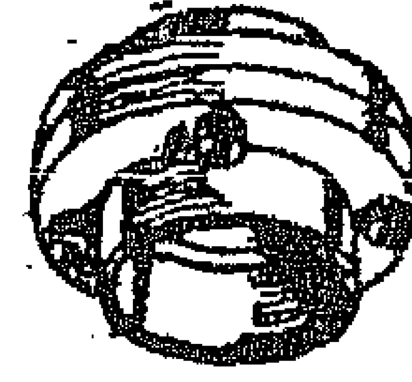


I.C.I.

رابط ورابط مختزل

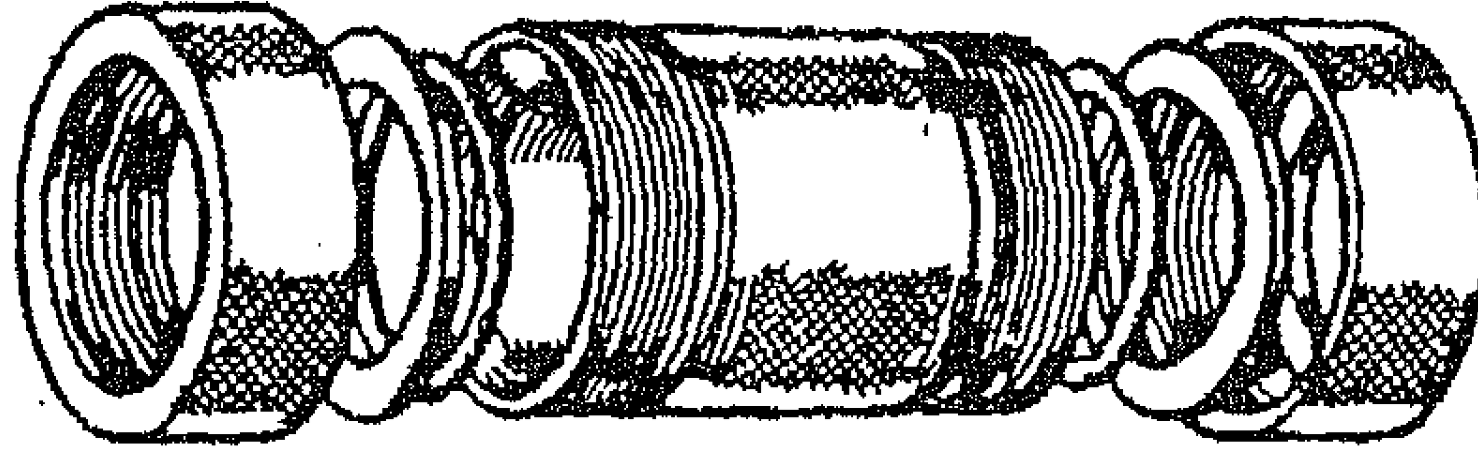
(لا يحتاج إلى لحام)

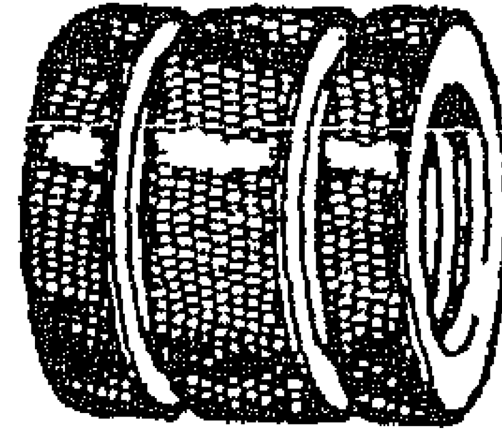




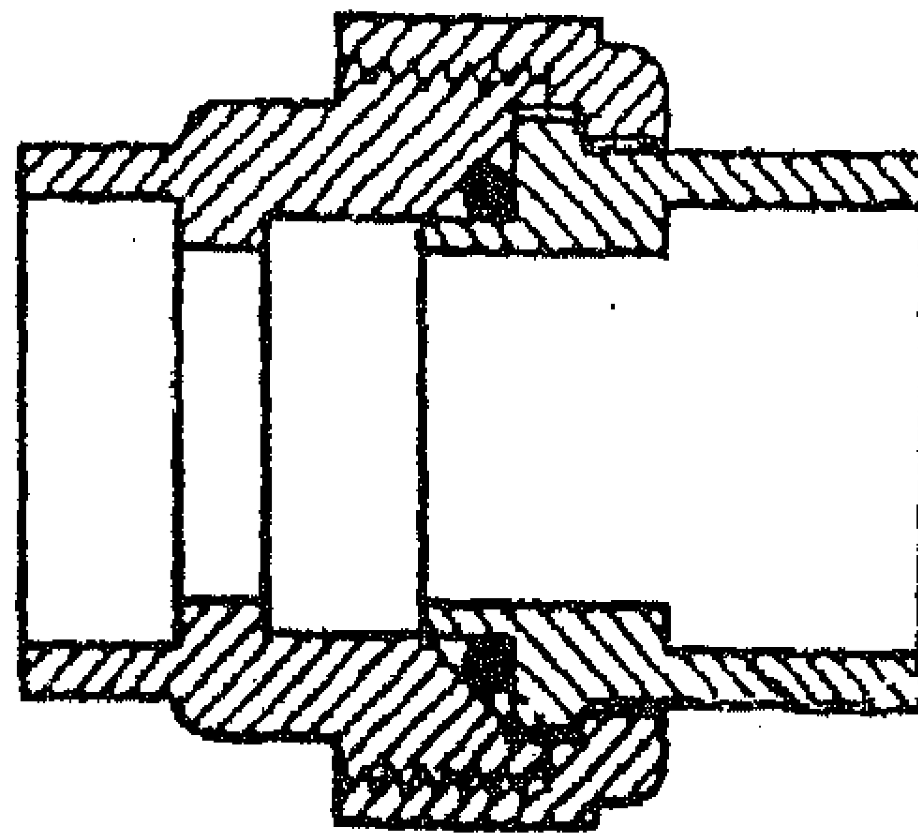


رابط ذو شفة (عادة ما يلحم بالانبوب)





روابط العنق السريع (N.G.N.) لا تتطلب لحام



رابط عنق سريع يلزم لحامه مع الأنبوب

**الشكل (4-11) وصلات نموذجية للأنابيب المجوفه.**

## ١-٦-١١ التشحيم Greasing :

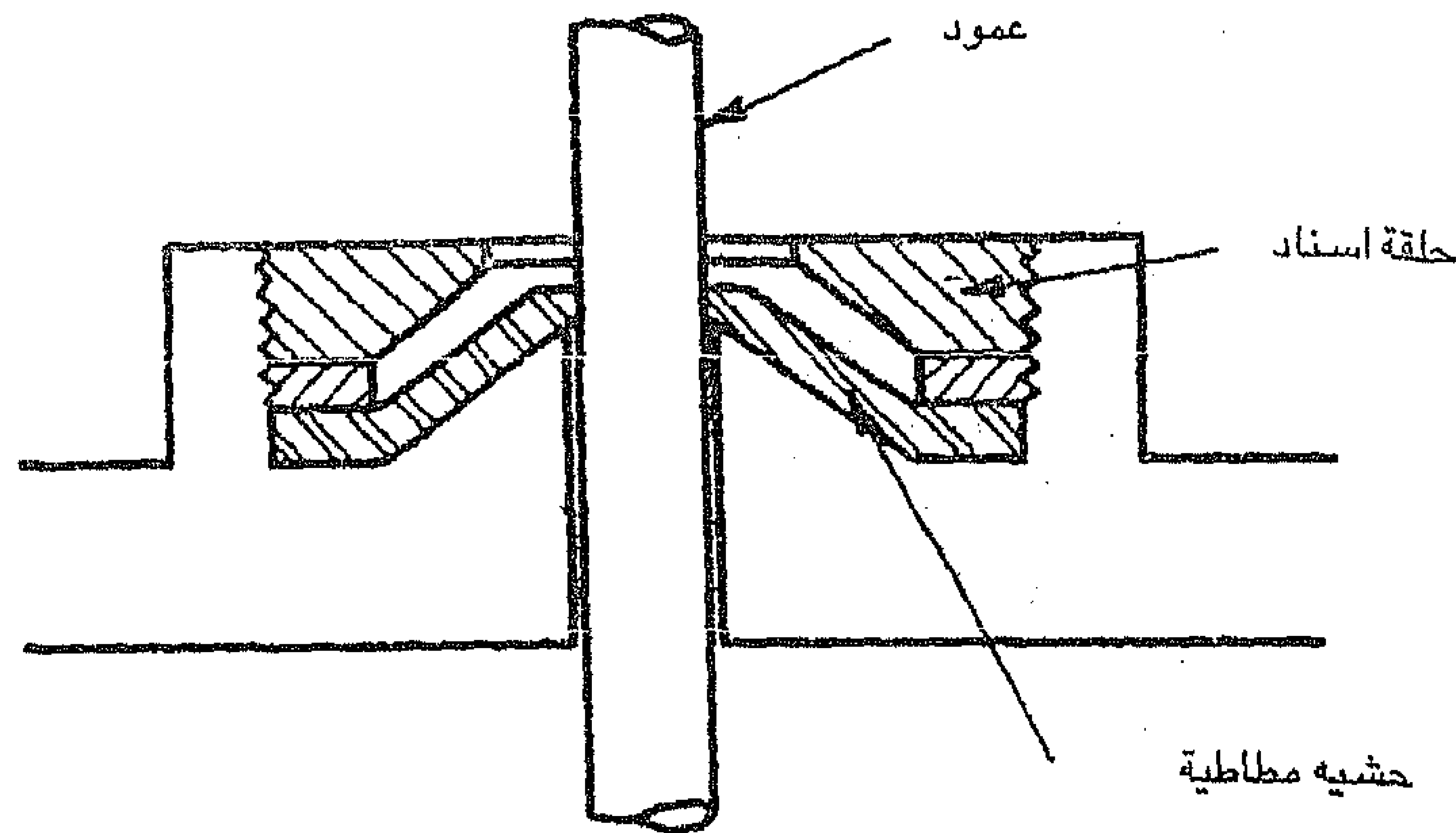
لايتم عادة تحقيق السد المحكم في اجهزة التفريغ عند استخدام حلقات المطاط الجافة. ولذا تم تصنيع شحوم خاصة بالفراغ لتشحيمها وتكون ذات ضغوط بخاريه واطئه. تختلف بعضها عن البعض الآخر من حيث سمك غشاء الشحم المستخدم ولزوجته والضغط البخاري ومدى درجات الحراره التي يصلح لها هذا الشحم او ذاك اضافة الى مدى الفراغ المراد استخدامه معه، ومن هذه الشحوم، على سبيل ، شحم ابيزون L(Apiezon"L") والمركب الكيماوي ابيزون "Q" وابيزون "W" وأخيراً شحوم السليكون التي تصلح لدرجات حراريه بين $40^{\circ}C$- وحتى $200^{\circ}C$.

## ٢-٦-١١ أعمدة السد (Sealing shafts) :

استخدم سداد ولسن (Wilson seal) لاول مره لنقل الحركة الدائرية اوالانتقالية من خارج جهاز الفراغ الى داخله، كالذي نحتاجه مثلاً في عمل الصمام الاعتراضي، الشكل (11-5) حيث تشطف سطوح الشفه (flange) الخارجيه الموضوعه على حجرة الفراغ ويثبت بها قرص مطاطي الى السطح المشطوف. يمر العمود المتحرك من خلال فتحة في القرص المطاطي لها قطر اصغر من قطر العمود. يسلط الضغط الجوي قوة على المطاط تجبره على الاحاطة بهذا العمود، وبوساطة وضع غشاء رقيق من شحم الفراغ يمكن غلق الثغرات حول العمود وإحكام السد بالرغم من انزلاق العمود او دورانه. ويمكن استخدام مقطع حلقي على شكل (O) ملائم يوضع في أخدود العمود او في جسم مسند العمود لتحقيق الغاية نفسها.

## ٧-١١ منظومة وحدة التفريغ Pumping Unit System :

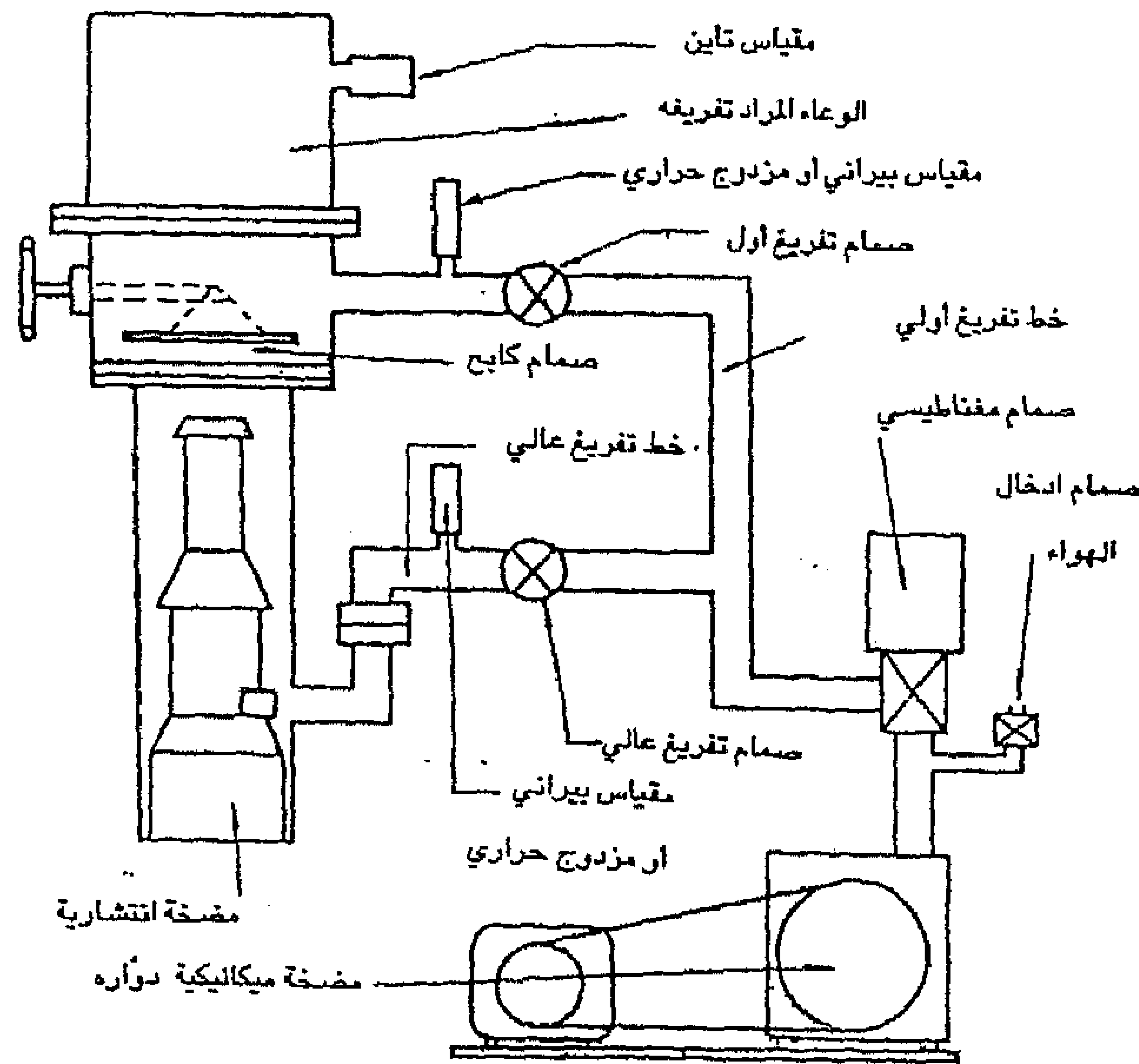
هناك تصاميم مختلفة لاجهزة الفراغ اعتماداً على درجة الفراغ المطلوبة وعلى حجم وتصميم الاوعية المراد تفريغها. وكل ما تحتاجه لتحقيق الفراغ الاولي هو شبكه من الانابيب تمتد من الوعاء المراد تفريغه الى المضخة الدواره. اما حجم وتصميم المضخة فتحددها متطلبات الجهاز. تستخدم المضخة الانتشارية عند الحاجة الى مدى فراغ عالي.




**الشكل (5-11) اسلوب السد لولسن.**

يبين الشكل (6-11) الاجزاء الرئيسة لوحدة الفراغ العالي.يكون الابتداء بتفريغ المنظومة من الهواء (الضغط الجوي) بوساطة المضخة الميكانيكية الدواره. يتم بعد ذلك تشغيل المضخة الانتشارية التي تكون مسنوده من الخلف بالمضخة الميكانيكية الدواره. يتم تحقيق هذين الغرضين باستخدام مضخة دواره واحدة. فعند البدء بمجرى جانبي (by passed) الى خط التفريغ الاولي (roughing vacuum line) الذي يتصل مع الجهاز (أو الوعاء) المراد تفريغه بوساطة صمام التفريغ الاولي (roughing vacuum valve). يتم غلق هذا الصمام بعد التفريغ ثم يفتح الصمام الخلفي للمضخة الانتشارية كما يتم فتح الصمام الموجود فوق المضخة (صمام الاعتراض) المؤدي الى الجهاز.

ومن الناحية العملية يتم تفريغ المضخة تفريغاً اولياً ويكون صمام التفريغ الاولي مغلقاً والصمام الخلفي مفتوحاً.الىأن يقل ضغط المضخة بمقدار كافي ليبدأ




الشكل (6-11) وحدة تفريغ مع الاجهزة الاساسية.

تشغيل مسخن المضخة الانتشارية. وعندما تصبح المضخة ساخنه لدرجة الاشتغال الفعلي والجهاز محكم التفريغ وصمام الاعتراض مسدود بصوره محكمة . يمكن بعد ذلك غلق الصمام الخلفي مع استمرار المضخة في العمل.

يجب ملاحظة المقياس الموجود في الخط الخلفي بصوره مستمره لمراقبة عدم زيادة الضغط اعلى من الضغط الخلفي للمضخة. وبعد غلق الصمام الخلفي يمكن فتح صمام التفريغ الاولي الى الوعاء لتفريغه . تستخدم المضخة المزودة بموازن الغاز (gas ballast) حيث من المحتمل ان يحتوي الوعاء المراد تفريغه على بخار الماء او ابخره أخرى حيث يجب فتح موازن الغاز قبل المباشره بالتفريغ للتخلص من هذه الابخره.

يجب الاستمرار في تفريغ الوعاء الى أن يصبح الضغط المقاس في الخط الخلفي اقل من $2x10^{-3}$ تور. وبعد هذا يمكن غلق صمام التفريغ الاولي ثم يفتح صمام الاعتراض وتستمر المضخة الانتشارية بالتفريغ. اما إذا فتحت المضخة الانتشارية

الى الجهاز قبل نقصان الضغط الى اقل من $2x10^{-3}$ تور فمن المحتمل حدوث انسياب خلفي (back streaming) ويزداد الضغط في الخط الخلفي نتيجة لزيادة مايدخل المضخة (through put)وان الزيادة الكبيره في الكمية الداخله للمضخة ربما تسبب زياده الضغط الى القيمة الحرجة في الخط الخلفي . ويجب الاستمرار في التفريغ الاولي لاكبر فترة زمنيه ممكنه او على الاقل الى ان يقترب الضغط من الضغط النهائي للمضخة الدواره.

تتم قراءة ضغط الفراغ العالي بوساطة مقياس التأين المتصل بالوعاء . ويجب عدم فتح هذا المقياس اذا كان من نوع الشعيره الساخنه مالم يكن قد مضى على اشتغال المضخة الانتشارية فترة زمنيه مناسبه.

تزود معظم الاجهزة في الوقت الحاضر بصمام مغناطيسي يوضع فوق المضخة الميكانيكية الدواره، يأخذ قدرته الكهربائية من طرفي المضخة الميكانيكية فإذا ماحدث اخفاق في تزويد القدره الكهربائية فسيكون جهاز الفراغ محمياً وذلك لإنغلاق الصمام المغناطيسي، وبهذا يتم منع انتقال زيت المضخة الى الجهاز وتلويثه. كما ان له فائدة أخرى هي السيطره مغناطيسياً على صمام دخول الهواء (inlet) والذي يسمح للهواء بالدخول الى المضخه بعد انغلاق الصمام المغناطيسي حماية للمضخة.

يبين الشكل (11-6) وحدة تفريغ أساسية حيث يمكن اعتماد هذه الوحدة لاغراض متعدده. يمكن استخدام اكثر من مضخة انتشاريه واحده كما قد تستخدم اكثر من مضخة ميكانيكية دواره ،كما في حالة جهاز معجل البروتون الخطي.

## ٨-١١ تطبيقات الفراغ:

يعتبر الفراغ ضروري في اغلب ان لم يكن كل ، الاجهزة الإلكترونية كالمجهر الالكتروني بكافة انواعه وانبوبة الاشعه السينيه وانبوبة أشعة المهبط وبعض عدادات الاشعة (الاشعة السينيه اوأشعة كاما) وغير ذلك من الاجهزة التي تستخدم

الحزمه الالكترونية كأساس في عملها. كما يستخدم الفراغ في مجالات أخرى في حقل هندسة المعادن والمواد، على سبيل المثال،مجهر المرحلة الحاره الضوئي (Hot stage Microscope) والافران المفرغه والتي قد تستخدم لصهر بعض السبائك والمواد او للمعاملات الحرارية لبعض السبائك والمعادن. وبصوره عامه يمكن اجمال دواعي استخدام الفراغ الى سببين رئيسيين او اي واحد منهما، اولهما منع التأكسد وثانيهما منع اصطدام الحزمة الالكترونية بجزيئات الغاز الكبيره الحجم نسبة الى حجم الالكترون . يتبين من ذلك انه لا يمكن الحصول على حزمة الكترونية عند وجود جزيئات الهواء وذلك بسبب الاستطارة الشديده الحاصلة من التصادم . وقد صممت كثير من الاجهزة الالكترونية بحيث انها لايمكن ان تصلها القدرة الكهربائية مالم يتحقق فيها الفراغ المطلوب وبصوره اليه كما في المجهر الالكتروني النافذ والمجهر الالكتروني الماسح ومحلل المجس الالكتروني الدقيق و سواها من الاجهزة.

كمايتم استخدام الفراغ في تحضير الاغشية الرقيقة (thin films) للمواد، بصوره عامه، ودراسة خواصها والتي تستخدم بصوره واسعة في حقل الهندسة الالكترونية وخصوصاً في تصنيع الدوائر الالكترونية الدقيقة وأجزاءها.

# تمارين الفصل الحادي عشر

١- ماهو المقصود بالفراغ وكيف يتم تقسيم مدياته؟

٢- ماهو المبدأ الذي تعمل عليه المضخة الميكانيكية الدواره؟

٣- ما فائدة صمام توازن الغازات في المضخة الميكانيكية الدواره؟

٤- اشرح اساس عمل المضخة الانتشارية مع الرسم.

٥- لماذا لاتستخدم المضخة الانتشارية لوحدها في تحقيق الفراغ العالي؟

٦- ماهي أهم الغايات التي يستخدم من أجلها الفراغ؟

٧- ماهي الوسائل المتبعة لوصل التراكيب والأنابيب وصلاً محكماً لتحقيق فراغ عالٍ.

# الفصل الثاني عشر

## قياس الانهاء السطحي (خشونة السطح)

## Measurement of surface finish

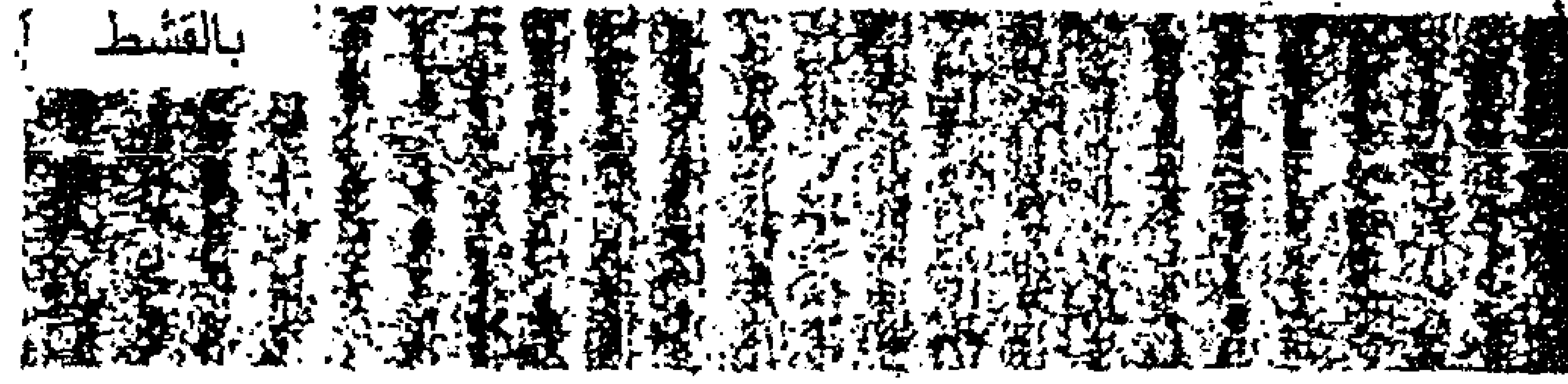
### ١٢-١ المقدمة Introduction :

الانهاء السطحي (surface finish) او دقة التشطيب هو عدم الانتظام الهندسي في سطح الجزء الناتج من عملية القطع بقلم القطع او من عملية التجليخ اواي عملية انهاء أخرى وليس المقصود هنا درجة لمعان السطح الشكل (12-1a).

وتختلف درجة انهاء سطوح المشغولات باختلاف طرائق التشغيل والانهاء سواء كانت بماكنات التشغيل او بالسحب (drawing) او بالطرق (forging) او بالدحو (rolling) او بالسبك (casting) اوبالطلاء الكهربائي او ..... الخ. كما وأنها تختلف باختلاف عمليات التشغيل والانهاء تبعاً لنوع ودقة ماكنة التشغيل حيث يتراوح مدى الدقة في الانهاء من ماكنات الكشط الكبيره التي تكون فيها التغذية العرضيه حوالي 25mm الى ماكنات الصقل الدقيق التي تكون فيها المسافة بين علامات الخدوش تصل الى مايكرون واحد (1μm) .

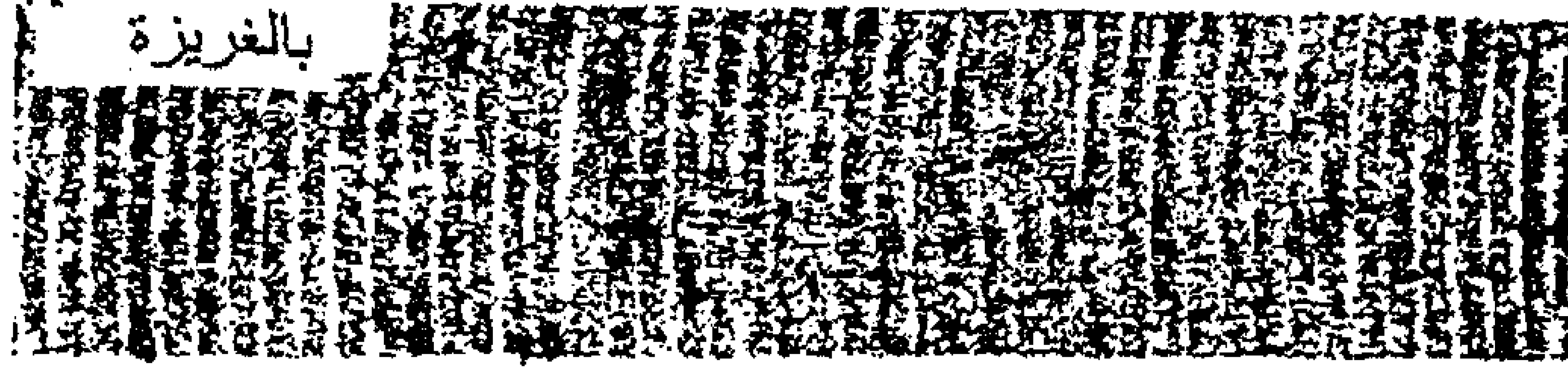
ويلاحظ ان ارتفاع التضاريس اوالنتوءات السطحية (نسج السطح) يكون اقل نسبياً من المسافة بين علامات التغذية (قمم تموجات السطح) حيث يتراوح مقدارها بين 100μm و 0.04μm .

وحيث ان التصميم الهندسي يهدف دائماً للوصول بالانتاج الى الحد الامثل بالنسبة لدرجة الاداء وقوة التحمل وحسن المنظر ،وبأقل كلفه، فقد تطلب التطور



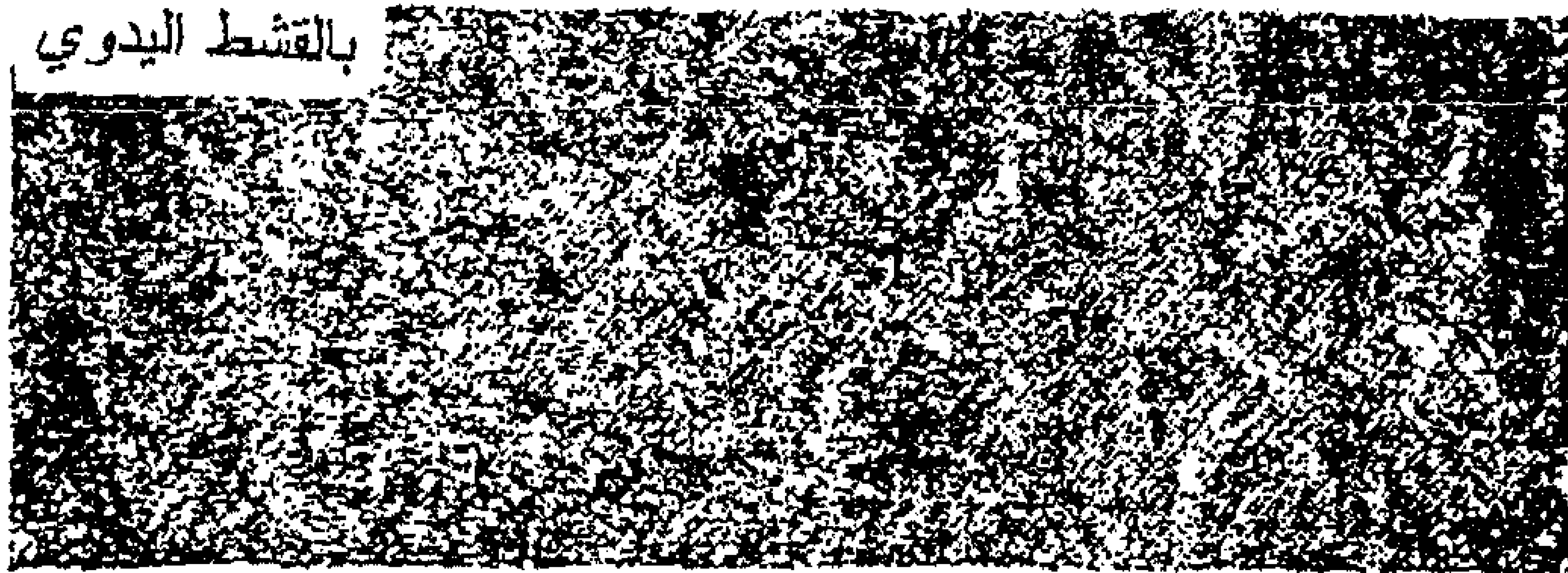
















شكل (1a-12) صور مكبره لنماذج من السطوح المشغلة امام كل منها نسبة التكبير المستخدمة. وتحت كل منها رسم يمثل المقطع العمودي للسطح (الجانبية ) وبنسب تكبير عاليه (الشاقولي بين 500 ضعف الى 1000 ضعف والافقي ثلاثة اضعاف).

الحاصل في التقنيات ليس فقط تحسين دقه الابعاد وإنما تحسين دقه نسج او تضاريس السطح (surface texture) لكل من الاجزاء المشغلة او غير المشغّلة وتأثيرها على الادوات المستخدمة. وهناك ثلاثة تأثيرات تجعل السيطرة على نسج السطح مهمة جداً وهي عمر الكلال (fatigue life) وخواص الارتكاز (bearing properties) والبلى (wear) .

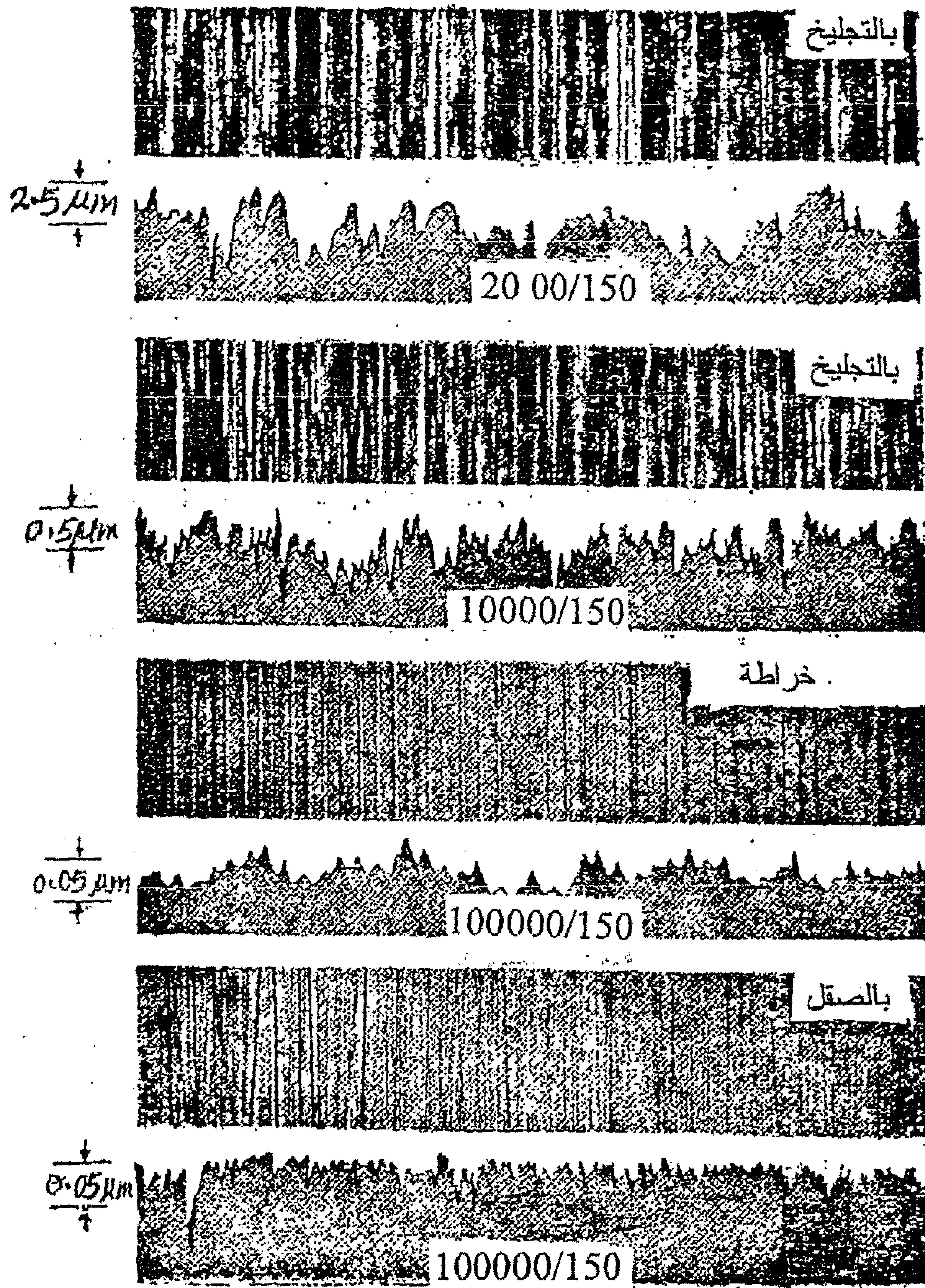
**١-١-١٢ عمر الكلال Fatigue life :**

إذا عرّض جزء ما الى اجهاد متقلب ومتكرر فسوف يعاني من الكلال وسيكون عمر الجزء اقصر بصوره اوضح مما لو سلط عليه حمل مكافئ ثابت. ويدعى عدد تقلبات الاجهاد الذي يصمد عند (يتحمله من دون كسر) اجهاد محدد بعمر الكلال (fatigue life) . ويبدأ الفشل الناتج عن ظاهرة الكلال دائماً عند الزوايا الحاده،حيث يحصل عندها تركيز للاجهادات وكذلك عند التضاريس السطحية والخدوش حتى ولو كان السطح غير مشغل.

ولقد تبين ان المسمار المعصمي(gudgeon pin) في بعض الماكنات، الذي يحمل الاحمال الدوريه، له عمر أطول بكثير اذا كان الثقب الذي يدخل فيه منعم بصوره افضل. علماً بأن ثقب المسمار المعصمي لايكون على تماس مع اي جزء آخر من الماكنه وفي الواقع يكون المسمار المعصمي مجوفاً وذلك لخفض الوزن المعكوس (reciprocating weght) .

**٢-١-١٢ خواص الارتكاز (المرتكزات) Bearing properties**

يعتبر السطح تاماً (perfect surface) إذا لم يتضمن عدم انتظام كالتضاريس اوالنتوءات ولكنه لايعتبر السطح الناعم جيداً تماماً (perfect smooth) من ناحية الارتكاز . فهناك احتمال كبير في حصول الالتحام (seizure) بسبب الصعوبة في المحافظة على غشاء تزييت وبالنتيجة يحدث تماس مباشر بين المعدنين . ولعل احسن هيئة للسطح الصالح للمرتكزات هو ذلك المبين في الشكل(1b-12) والذي فيه تقلل مساحات التماس الكبيره الاحتكاك حيث تعمل المناطق المنخفضة في بنية السطح على الاحتفاظ بغشاء التزييت.




**شكل (12-1b) صور مكبره لنماذج من السطوح المشغلة امام كل منها نسبة التكبير المستخدمة وتحت كل منها رسم يمثل المقطع العمودي للسطح (الجانبية ) وبنسب تكبير عاليه (الشاقولي بين 200 و 100000 ضعف والافقي 150 ضعف ).**

### ٣-١-٢-١٢ البلى Wear

من الثابت في علم الفيزياء ان الاحتكاك لايعتمد على مساحة التماس الا ان معدل البلى يعتمد على مساحات التماس، فإذا زادت مساحة التماس فسيقل مقدار الحمل لوحدة المساحة ومن ثم يقل معدل البلى .

### ٣-٢-١٢ ما المقصود بنسيج او تضاريس السطح Meaning of Surface Texture

قبل القيام بأي عمليه قياس من الضروري تعريف ماهوالشيء المطلوب قياسه، والواقع لم يكن هذا صعب في الكثير من حالات القياس ولكنه حتى عندما يتم تعريف نسيج السطح لم يكن تحقيق القياس سهلاً.

يعرّف التموج (waviness) غالباً بأنه خطأ من النوع الناتج عن هندسة غير دقيقة للعملية التي تنتج السطح اوتجرى عليه ولذلك فهي خارج نطاق نسيج السطح. اماالخشونة (roughness) فيمكن تعريفها بعدم الانتظام السطحي الذي لايمكن تفاديه والناتج من عمليه تمت في ماكنه تامه هندسياً على سبيل المثال، عملية القطع او سكينة القطع او عملية التجليخ او عملية تشطيب. وتختلف درجة تشطيب (انهاء) سطوح المشغولات باختلاف طرائق التشغيل والانهاء سواء كان بماكنات التشغيل او السحب او بالطرق او الدحو (rolling) كما أنها تختلف باختلاف عمليات التشغيل والتشطيب تبعاً لنوع ودقة ماكنة التشغيل . يبين الشكل (1a,b-12) بعض نماذج من السطوح المشغلة موضحاً امام كل منها نسبة التكبير المستخدمة ، حيث تمثل الصور المنظر الافقي للسطح مكبراً ثلاثة اضعاف او مئة وخمسون ضعفاً، وتحت كل منها صورة المقطع العمودي للسطح حيث تتراوح نسبة التكبير في هذه الصور بين الاربع مئة ضعف والخمس وسبعون الف ضعفاً.

ان امكانية عزل وقياس عدم الانتظام هذا هو الذي يعنينا في هذا الفصل من الكتاب .

يمكن توضيح الاسلوب الذي يمكن ان تتداخل فيه الخشونة والتموج في اي جزء مشغل اذا تأملنا متطلبات المخرطه (Lathe machine) لعمل جزء اسطواني تام. فمن الضروري اذن ان تتحرك الادا ة بصورة موازيه لمحور الدوران. فلو تصورنا انه في مخرطة ما كان احد المركزين اعلى من الآخر. فسيؤدي ذلك الى نشوء سطح بشكل بكره خيوط (bobbin) (الدوران على هيئة القطع الزائد -hyper boloid revolution). اضافة الى ذلك فلو لم يحافظ على استقامة حركة الاداة فقد تنشأ سلسله من الامواج القصيره متداخله على شكل منحنى موجي طويل وفوق كل ذلك ستظهر على السطح علامات تغذية الاداة ايضاً. اضافة الى ما تقدم قد تكون هناك اطوال موجية قصيرة ناتجة عن تذبذب اداة القطع ومن ثم سيحتوي السطح على اربعة انواع من عدم الانتظام (بغض النظر عن وجود عدم الاستداره) جاعلة الجزء غير اسطواني بصوره حقيقية. وأسباب هذه هي:

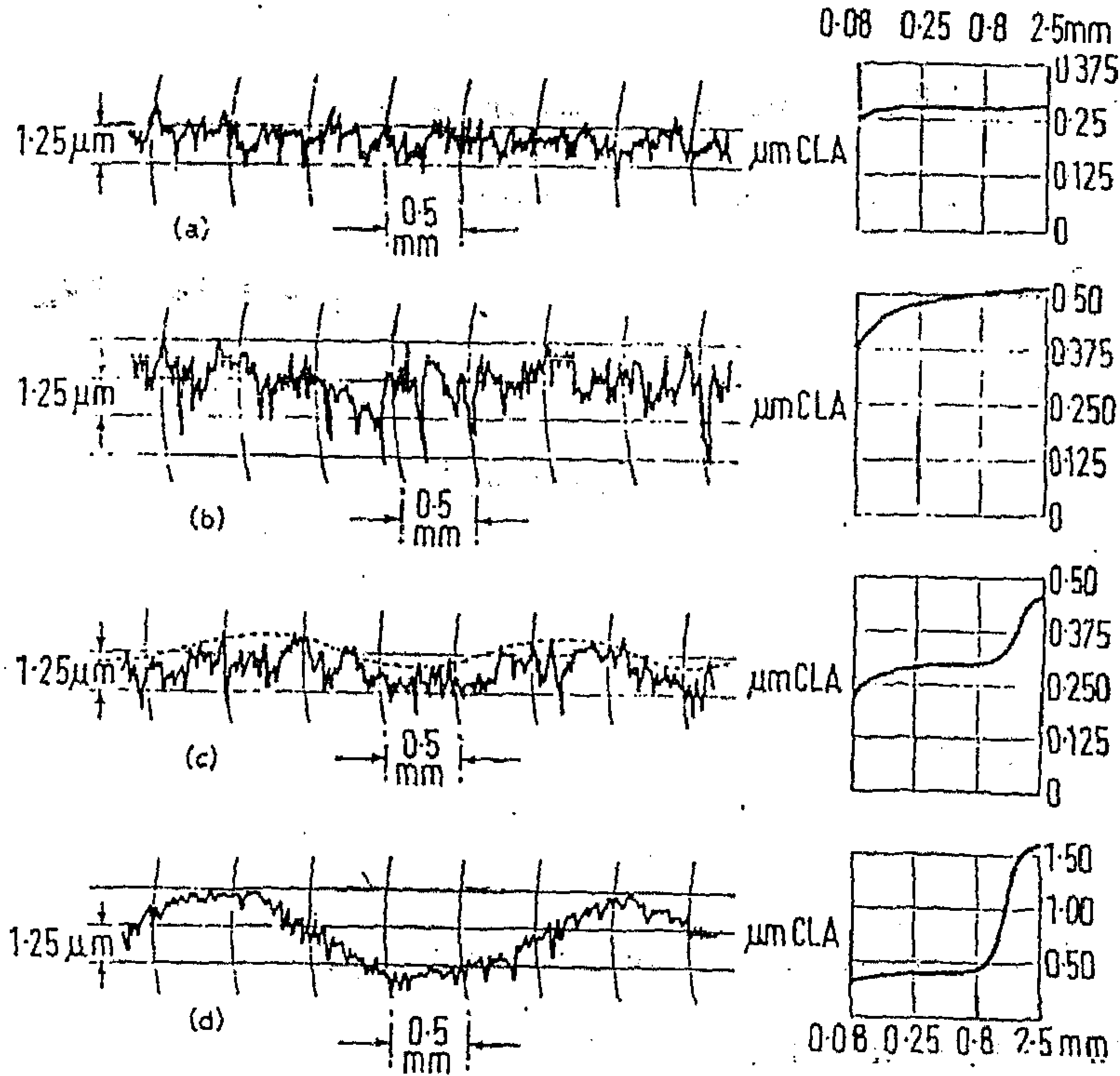
أ- نتيجة عدم استقامة المركزين (misalignment of centres)
ب- نتيجة لحركة التغذية غير الخطية (nonlinear feed motion)
وهما سبب التموج

جـ- نتيجة لمعدل تغذية اداة القطع (tool feed rate)
د- نتيجة لتذبذب اداة القطع (tool chatter)
وهما سبب الخشونة

ان فصل التموج عن الخشونة هو أحد المشاكل في قياس درجة انهاء السطح (surface finish). ولفهم طريقة الفصل هذه يمكن تأمل حقل (ارض زراعية) محروث آلياً، فإذا تم النظر الى الحقل ككل فإن التموج هو الغالب. وإذا تم من ناحية ثانية فحص طول محدد، وليكن 30cm، من الحقل حيث يكون التموج ذو طول موجي مقداره 3m فسوف يتضمن مثالنا جزء قليل من التموج ومن ثم يمكن التركيز على الخشونة.

وبالتشابه اذا اقتصر الفحص للسطح المشغل على طول قليل (أقل من الاطوال الموجيه) فسوف يتضمن القياس الخشونه فقط. لقد عرّف الطول الموجي الاعظم بطول موجة القطع (cut-off-wavelength) وقد تمت معايرته في بريطانيا بموجب المواصفة البريطانية للتقييس B.S.1134 بالأطوال 0.25mm و0.8mm و 2.5mm حيث يعتمد هذا الانتقاء على السطح المراد فحصه. فإذا لم يحتوي السطح على تموج فسيتم الحصول على نفس قيمة الانهاء السطحي مهما كان الطول المفحوص للسطح، كما يظهر في الشكل (2a-12) . فإذا ازدادت قيمة التموج فإن القيمة العددية لتضاريس السطح سوف تزداد ايضاً كلما ازداد طول الموجه كما مبين في الشكل (2b, c,d-12) كل هذه الاشكال تمثل نماذج منعمة (ground specimens) وبدرجات مختلفة من آثار تذبذب اداة التنعيم.

يكون الطول المفحوص او طول القطع0.8mm عادة للسطوح المنعمة. اما بالنسبة للأجزاء القصيرة، على سبيل المثال، حلقات المكبس (Piston rings) فيكون الطول 0.25mm هو الاكثر ملائمة لفحص نسيج السطح لأن في مثل هذه الاجزاء القصيرة لايتضمن السطح تغيّراً في تضاريسه على مدى المسافات البعيده نسبياً. وكقاعده عامة لقياس نسج (تضاريس) السطح المشغّل بأداة نقطيه فيجب ان لايزيد طول موجه القطع (cut-off wavelength) عن المسافه البينيه للتغذية.




الشكل (2-12) تأثير طول موجه القطع على التخمين الرقمي لانهاء السطح.

## ٣-٢ ١ طرائق قياس الانهاء السطحي
## : (Methods of Measuring Surface Finish)

تتوفر عدد من طرائق قياس الانهاء السطحي للجزء المشغل وهي بصوره عامه تصنف الى صنفين هما:

أ- طرائق المقارنة.

ب- طرائق القياس المباشرة

تعتبر طرائق المقارنة محاولات لتخمين نسج السطح بوساطة مشاهدة السطح اوالإحساس به. ومن الضروري ان تكون المقارنة مع سطح مماثل لأن هذه الطرائق تؤدي الى نتائج خاطئة اذا لم تتم المقارنة مع سطوح مشغلة بتقنيات متشابهة . ان

مظهر السطح يعتمد بصوره كبيره على نمط الخدوش واتجاه الخدوش ويتأثر بصورة اقل بعمق هذه الخدوش. وهذه الحقيقة تنطبق على الفحص المجهري ايضاً، كما في (12-3) الذي يمثل التكبير المجهري لسته سطوح مختلفة حيث تبدو جانبيه السطح (Surface profile) كما مبيّن بالآثار المرسومة لكل صورة.

ولعل طريقة تخمين نسيج السطح باللمس هي افضل من المشاهدة العيانيه وقد تؤدي هذه الطريقه الى نتائج خاطئة اذا لم تتم المقارنة بين سطوح مشغلة بطرائق متشابهة. وقد تم توفير معايير مقارنة قياسية للسطوح من قبل الشركات على سبيل المثال، روبرت وشركاءه (Rubert & Co.) في ما نجستر ولعمليات تشغيل مختلفة في حين صنعت شركات اخرى مثل شركة نورتن لدواليب التنعيم (Norton Grinding Wheel Co.) اسطوانات منعمه قياسيه.

لقد تم تطوير طرائق قياس مباشره للتمكين من وضع قيم عدديه للإنهاء السطحي وكل هذه التقنيات تقريباً هي من نوع اجهزة مجس المرقم (stylus probe type) اضافة الى طرائق التداخل الضوئي (Interfero metric methods) التي تكون ملائمة للسطوح العاكسة.

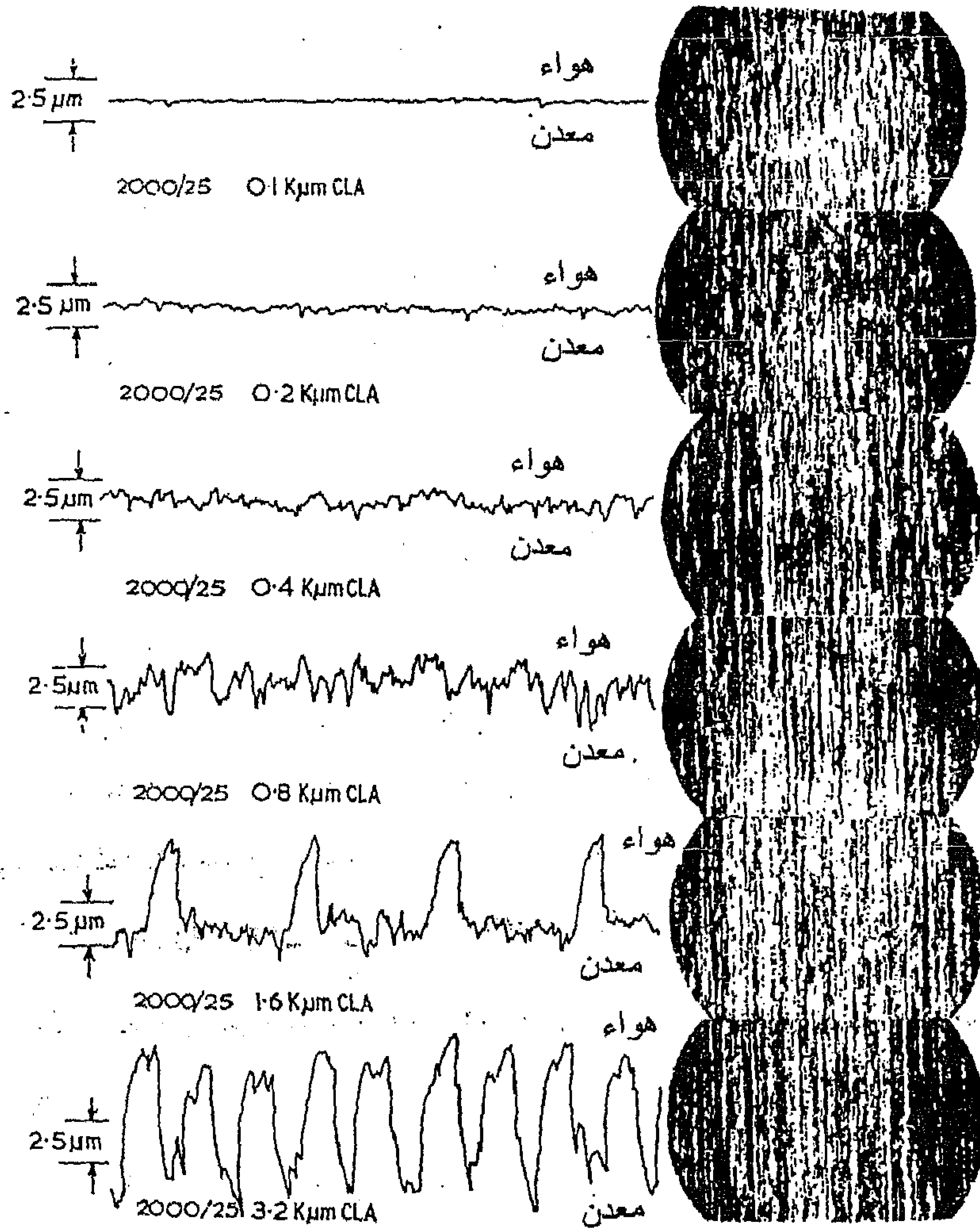
**١-٣-١٢ اجهزة مجس المرقم (Slylus Probe Instruments) :**

يمكن تقسيم اجزاء الاجهزة من هذا النوع. في كل الحالات تقريباً، الى الوحدات التالية:

أ- منزلق او حذاء ينسحب ببطء على السطح ويتتبع وضعه بصفة عامه وهكذا يزودنا بالمعلومات.

ب- مِرقَمْ او مجس يتحرك على السطح مع المنزلق وبصوره عموديه بالنسبة الى المنزلق وهذه الحركة ناتجه من خشونة السطح.

جـ- جهاز لتضخيم حركة المِرقَمْ.




الشكل(12-3) سطوح ذات منظر متشابه، نظراً لشدة تقارب خطوط التغذية الا انها تمتلك صفات انهاء مختلفة بصوره كبيره. التكبير الشاقولي 2000 ضعف والافقي 25 ضعف.

ملاحظة: الحرف K هنا يعني ان طول موجة قطع مقداه 0.8mm قد تم استخدامه.

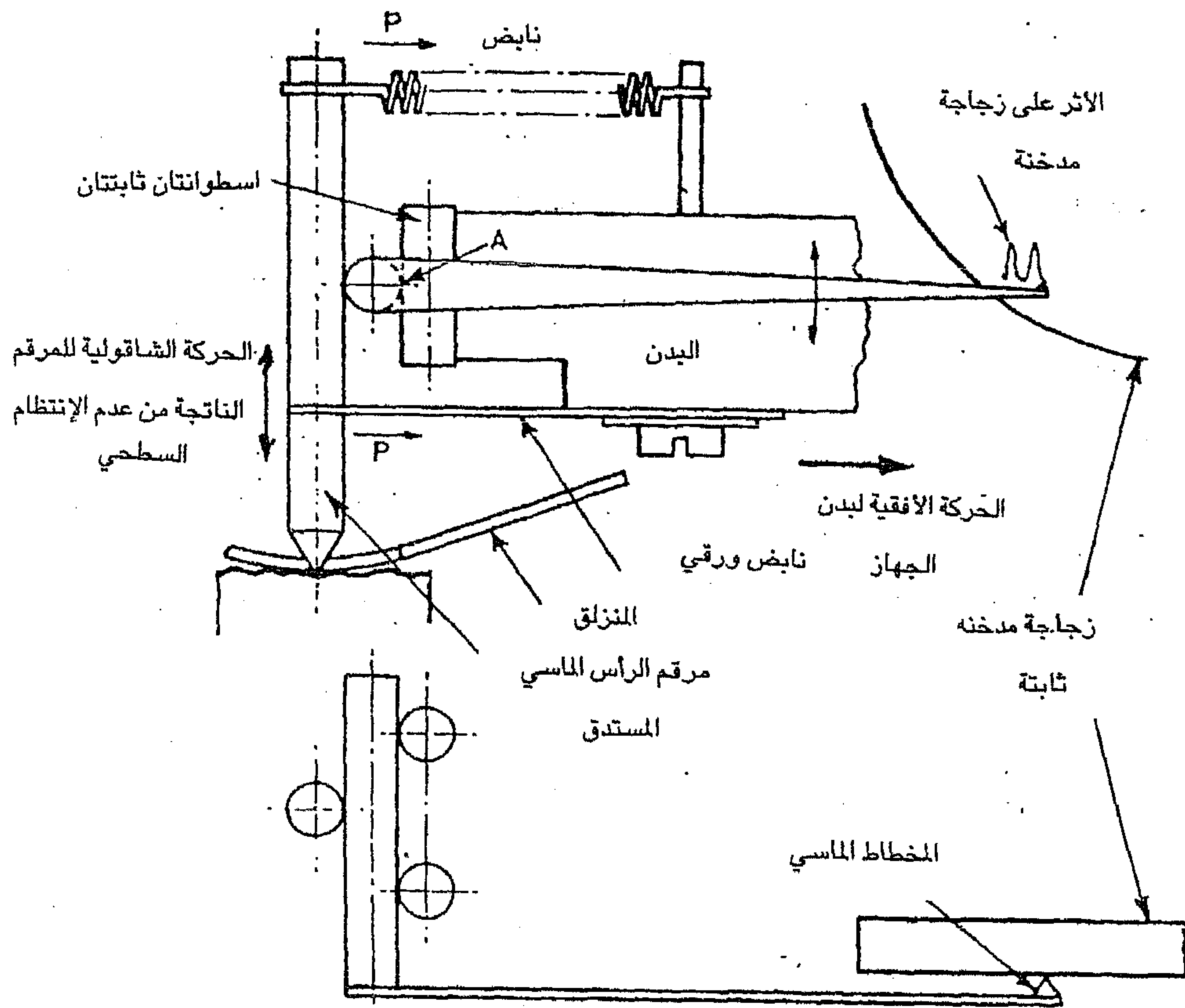
د- جهاز التسجيل لتكوين أثر او تسجيل لجانبية السطح. والذي يجب ملاحظته هنا هو ان كل التسجيلات او الآثار تكون مشوهه اي ان مقدار التكبير الافقي يختلف عن التكبير العمودي، وذلك للتمكن من إظهار المعالم العمودية على الاثر بصوره جليه ولطول معقول . فإذا تم تكبير طول قياس مقداره 0.8mm خمسة آلاف ضعف فسيلزم للأثر الناتج طولاً مقداره 4m .

هـ- وسائل لتحليل منحنى الجانبية الناتج . ويمكن ان تكون هذه الوسائل من ضمن الجهاز او قد تكون بصوره منفصلة عنه. يمكن لاجهزة ذات انظمة تكبير ميكانيكية او الكترونية ان تحقق هذه الصفات او الاهداف.

**٢-٣-١٢ مقياس السطح لتوملنسن: (Tomlinson surface Meter)**

تستخدم في هذا الجهاز طرائق التكبير الضوئى الميكانيكي (Mechano- Optical Magnification) ، وقد تم تصميمه من قبل الدكتور توملنسن من مختبر الفيزياء الوطني . يبين الشكل (12-4) الاجزاء الرئيسه له. فيتصل الحذاء بجسم الجهاز حيث يضبط ارتفاعه وذلك لجعل الابره الماسيه تتموضع بصوره ملائمة.يتم تقييد المرقم من كل أنواع الحركة عدا الحركة العمودية بواساطة نابض ورقي وآخر حلزوني. فالشد في النابض الحلزوني "P" يؤدي الى شد مشابه في النابض الورقي. حيث تمسك هذه القوى الاسطوانه المستعرضه بين المرقم من جهة واسطوانتين ثابتتين متوازيتين من جهة أخرى كما هو مبين في الشكل التخطيطي . وقد ربط في الاسطوانه المستعرضه ذراع نابضي خفيف من الفولاذ يحمل فوق نهايته ابره ماسيه تؤثر في حاجز زجاجي مدخّن.

ويعمل الجهاز عند سحب الجسم بهدوء عبر السطح المراد تقيم خشونته بواسطة لولب يدور دوره واحده في الدقيقة وبمحرك (ماتور) متزامن حيث تبقى الزجاجه مستقرة.




الشكل (12-4) مقياس السطح لتوملنسون.

يسبب عدم الانتظام في السطح حركه عموديه للمرقم والذي يجعل الاسطوانه المستعرضه تتحرك دائرياً حول النقطة (A) حيث يؤدي الى تكبير حركة الابرة الماسيه المحموله على الذراع. تزدوج هذه الحركة مع الحركة الافقيه لتوليد الاثر على الزجاجه وبتكبير مقداره مئة ضعف بالاتجاه العمودي ولايوجد تكبير للأثر بالاتجاه الأفقي.

ينقل الاثر المتكون على الزجاجة المدخنه بوساطة الاسقاط الضوئي على حاجز ابيض حيث يتم تكبيره خمسون ضعفاً اضافياً وبذلك يكون مجمل التكبير العمودي هو خمسة الآف ضعف والتكبير الافقي خمسون ضعفاً. وعندئذٍ يمكن رسم الاثر باليد اوبطرق التصوير الضوئى ثم يتم تحليله.

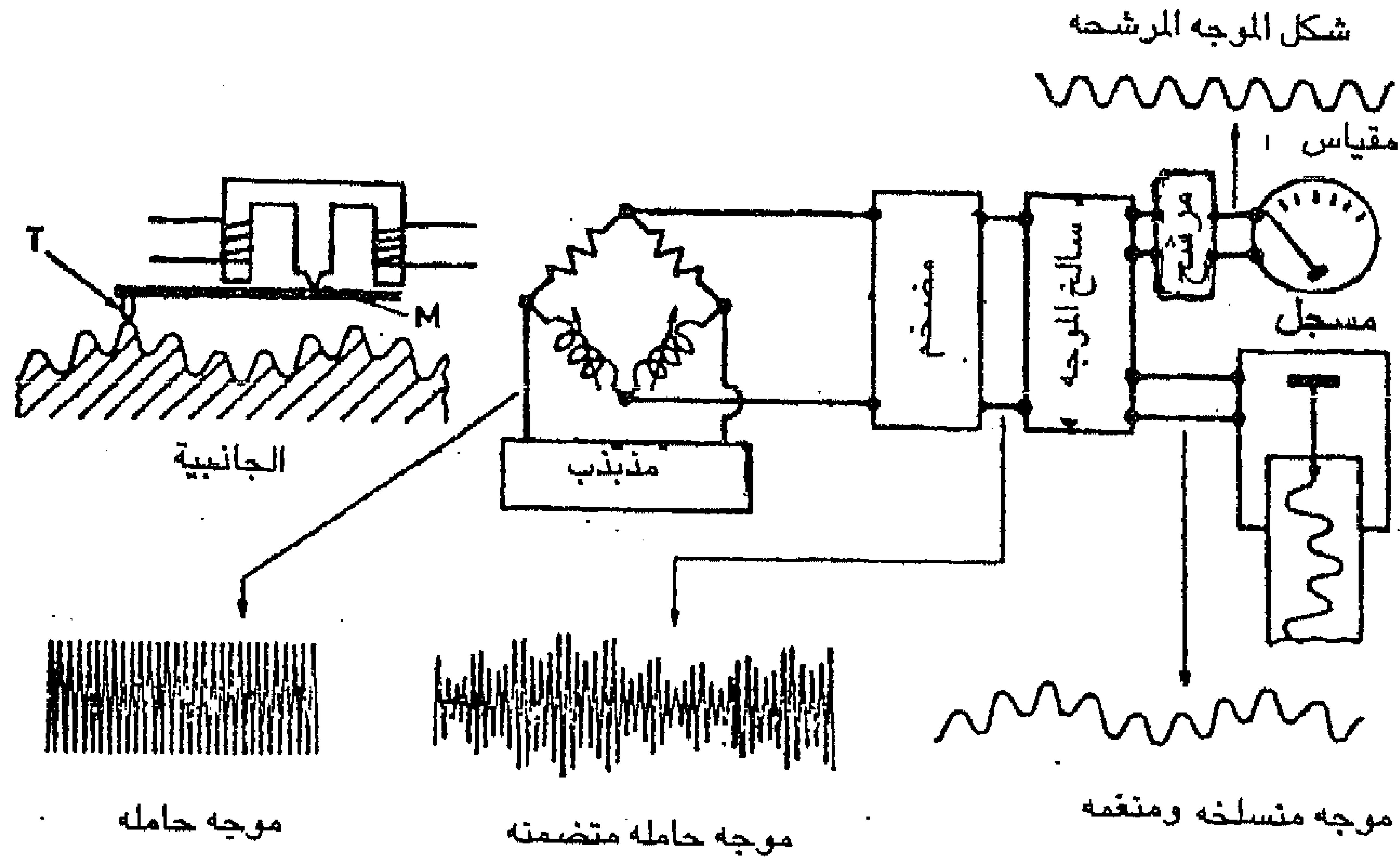
### ٣-٣-١٢ جهاز تيلور وهوبسون (تيليسيرف):

**Taylor - Hobson "Talyurf"**

ان التيليسيرف جهاز الكتروني . ويمكن ان يعتبر اساس عمل الجهاز مشابهاً لجهاز تومانسن وهو يفرق عنه بالدرجة الاساس في طريقة التكبير. فهو يعطي نفس المعلومات لكن بسرعة اكبر وربما بدقه أعلى ايضاً. وهويمكن ان يستخدم في المصنع وفي المختبر على حد سواء، إلا أن جهاز تومانسن مصمم أساساً للإستخدام في المختبر.

يتكون رأس المقياس ، كما هو الحال في جهاز تومانسن ، من المرقم وضابط الحركة (T) الذي يُسحب عبر السطح المراد فحصه بوساطة محرك كهربائي وصندوق تروس، يشكل الذراع الحامل للمرقم (stylus) في هذه الحالة ، حافظه مغناطيس (armature) والذي يدور حول الجزء المركزي على شكل حرف (E) (يتكون من شرائح فولاذيه مصفوفة على بعضها) حيث يُلف على كل ذراع من الذراعين الخارجيين ملف يمر به تيار متناوب (A.C) كما في الشكل (12-5) .

فعندما تدور حافظة المغناطيس حول النقطة M فستؤدي الى تغير الفسحتين الهوائيتين وكنتيجة لذلك تتغير سعة التيار المتناوب الاساس المار في الملفين.حيث ان هذه التشكيله تكون جزء من قنطرة الدائرة التي مخرجاتها تتألف من الاشارة المعدله فقط.تغذى الاشاره المعدله الى جهاز تضخيم وهذا يؤدي الى ان يعمل قلم المسجل ليكوّن تسجيلاً دائمياً اضافة الى المقياس الذي يعطي تخميناً رقمياً مباشراً.




شكل (5-12) رسم تخطيطي لجهاز تيلر – هبسون (تيليسيرف).

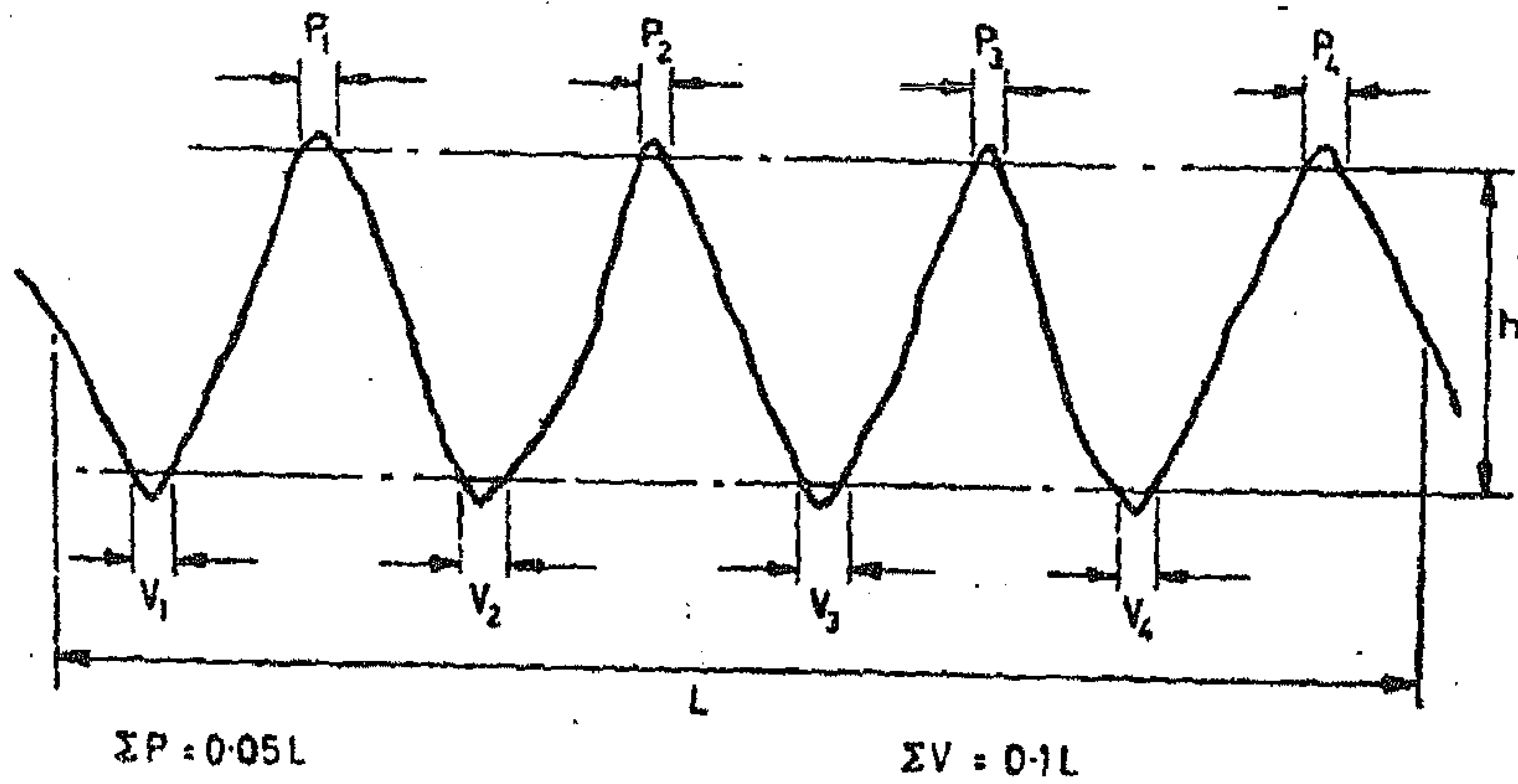
## ٤–١٢ تحليل آثار السطح Analysis of Surface Traces :

يتم تحديد التخمين الرقمي للسطح ليشير الى درجة نعومته (أو خشونته) باستخدام عدد من الطرائق . فتستعمل تقنيات مختلفة في البلدان المختلفة فعلى سبيل المثال تستخدم المملكه المتحدة وبعض أقطار الكومنولث (Commonwealth) والولايات المتحدة الامريكية (منذ سنة 1955 ) طريقة معدل الإرتفاع (Average height) في حين تستخدم السويد وعدة اقطار اوروبية قيمة الارتفاع بين القمة والقعر بينما تستخدم الاقطار الاخرى قيمة جذر معدل التربيع (Root mean square vallue) .

## ١-٤-١٢ طريقة الارتفاع بين القعر والقمة (Root to Valley Height) :

يشير اسم هذه الطريقة (الارتفاع بين القعر والقمة) الى اسلوبٍ بسيط نسبياً في التحليل، لكنه اذا تم التفسير بمجاله الواسع فهو يعني ان القمة والقعر المستخدمه سوف تكون نادرة الاستخدام وبصوره لاتقبل الشك تقريبياً وان القيمة الحاصلة تخميناً سوف لا تمثل السطح .

وللتغلب على هذه المشكلة فإن ارتفاع القعر – قمه يعرّف بأنه المسافة بين زوج من الخطوط المتوازية لمكان معين من الاثر موضوع بحيث تكون المسافات التي هي ضمن القمم في الاعلى تساوي 5% من طول خط الاثر وان المسافات التي تقع ضمن القعور في الاسفل تساوي 10%من طول خط الاثر . وقد تم تمثيل ذلك في الشكل (12-6) .




شكل (12-6) التمثيل بالمنحنى بين القمة الى القعر.

## ٢-٤-٢ ١ قيمة جذر معدل المربعات (Root Mean Square Value) :

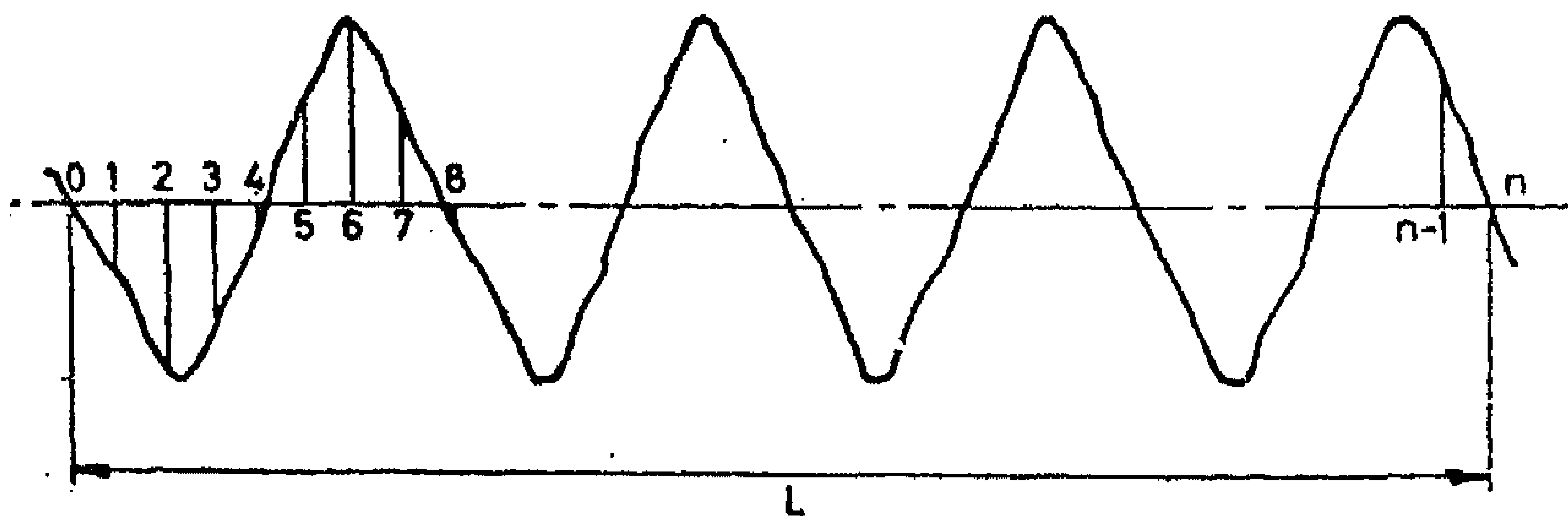
كانت هذه الطريقة قياسية حتى سنة 1955 في الولايات المتحدة الامريكية والتي تم بعدها اعتماد طريقة ارتفاع المعدل (الطريقة 3-4-12) في القياس . وتعرف الطريقة اعلاه بأنها قيمة الجذر التربيعي لمعدل المربعات للإبعاد الشاقوليه التي تقاس من خط وسطي.

ولو تم تأمل الشكل (12-7) وعند فرض ان الابعاد الشاقوليه ($h_s$) متساوية المسافة البينيه وقائمة عند المواضع المرقمه 1 و2 و 3 ....وn والتي ارتفاعاتها $h_1$ و $h_2$ و$h_3$ ........و $h_n$ على التوالي فإن

$$h_{r.m.s} = \sqrt{\frac{h_1^2+h_2^2+h_3^2+....h_n^2}{n}} \qquad ..........(1-12)$$

أو أن

$$h_{r.m.s} = \{\frac{1}{L}\int^{L} h^2 dL\}^{\frac{1}{2}} \qquad ..............(2-12)$$




شكل (12-7) التمثيل بالمنحنى لجذر معدل المربعات.

٣-٤-١٢ طريقة معدل خط المركز (Centre Line Average Method):

تعتبر قيمة معدل خط المركز (C.L.A) قياسية وقد اعتمدت في بريطانيا ومنذ سنة 1955 تم اعتمادها في الولايات المتحدة ايضاً كما مر ذكره.ويمكن تعريفها بأنها معدل الارتفاع من خط وسطي، و لكل الابعاد الشاقوليه على السطح بغض النظر عن اشارتها. ولذا تكون قيمة C.L.A عند الرجوع الى الشكل (12-7) الآتي:

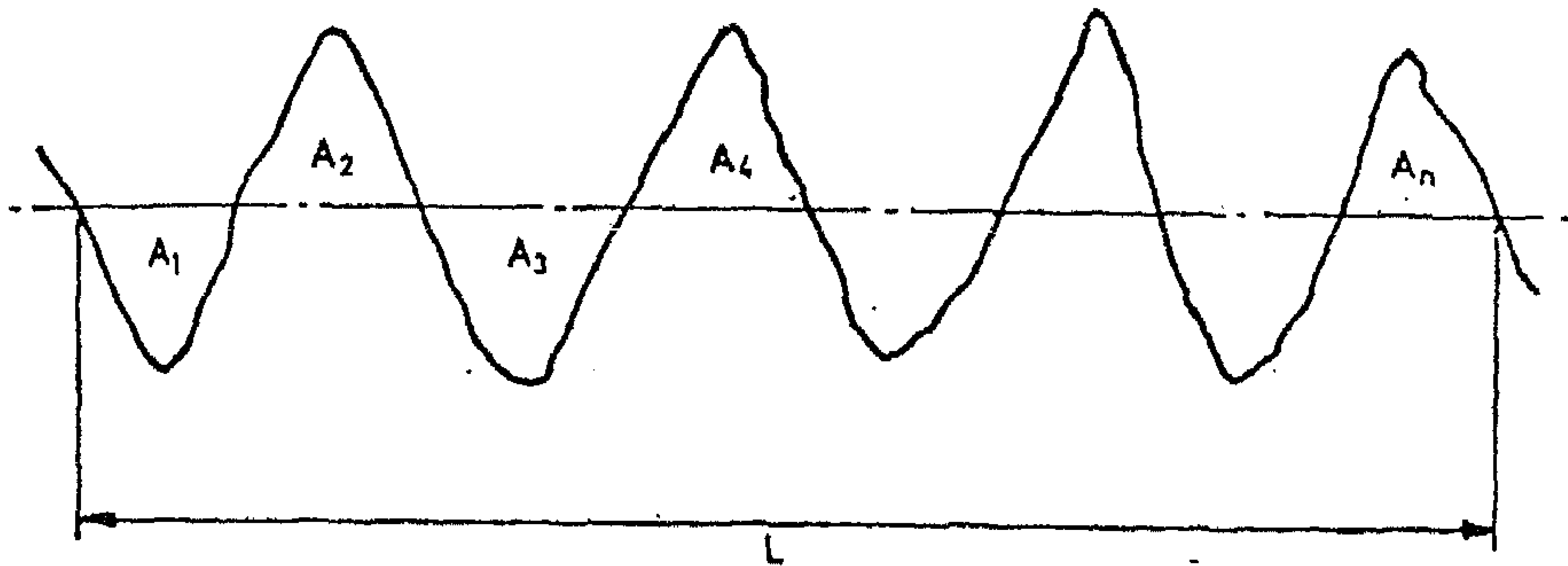
$$C.L.A = \frac{h_1+h_2+h_3+h_4+\ldots\ldots h_n}{n} \qquad \ldots\ldots\ldots\ (3\text{-}12)$$

$$= \frac{\Sigma h}{n}$$

يتطلب تعيين قيمة معدل خط المركز (.C.L.A) بوساطة اقامة اعمدة شاقوليه جهداً كبيراً حيث يعتبر ذلك عملاً صعباً وممل. و اذا تم اختيار مسافات غير موفقه بين الاعمدة فإن نقاطاً مهمة على السطح قد تهمل . ولذلك لو قسمت المساحة غير المنتظمة على الطول الموجي الخاص بها فإن القيمة الناتجة هي الارتفاع المعدل للمساحة.ويمكن قياس مثل هذه المساحة باستخدام المساح (Planimeter)، فلو تم تأمل عدد غير محدود من الاحداثيات الشاقوليه، وان تؤخذ في الاعتبار كل نقطة على السطح . وبالإشارة الى الشكل (12-8) يمكن ملاحظة ان الخشونة

$$C.L.A. = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \ldots\ldots + A_n}{L}$$

$$= \frac{\Sigma A}{L}$$




**شكل (12-8) التمثيل بالمنحنى لمعدل خط المركز**

لذلك تكون القيمة التي يتم الحصول عليها هي معدل ارتفاع الاثر. وللحصول على قيمة .C.L.A للسطح المعين فمن الضروري ان تقسم هذه القيمة على مقدار التكبير الشاقولي للأثر ومن ثم ضربها في $10^3$ لنحصل على القيمة بالميكروميتر

$$C.L.A = \frac{\Sigma A}{L} \times \frac{10^3\ \mu m}{\text{مقدار التكبير الشاقولي}}$$

حيث تمثل

$\Sigma A$ = مجموع المساحات فوق وتحت خط الوسط بالمليميتر المربع ($mm^2$) .

$L$ = طول خط الوسط بالمليميتر (mm) .

ومن الضروري قبل البدء بمثل هذه القياسات تحديد موضع خط الوسط بحيث ان المساحات التي تقع فوقه وتحته تكون متساوية وبتفاوت مقداره 5%. يمكن عمل هذا الشيء بالآتي:

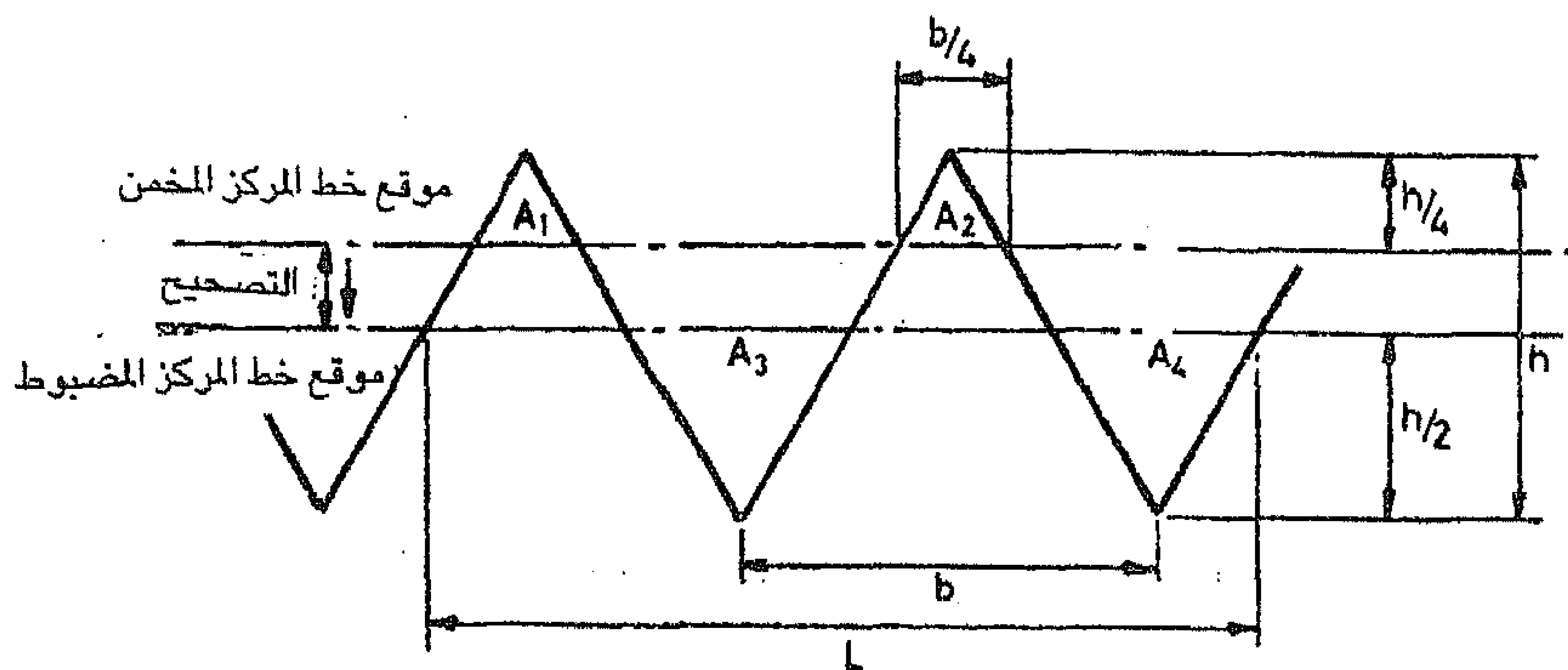
أ- تخمين موضع الخط بالعين.

ب- قياس مجموع المساحات فوق وتحت موضع الخط المخمن.

جـ- يصحح موضع الخط بمقدار يساوي الفرق في المساحات (الفوق والتحت) مقسوماً على طول خط الاثر.

$$\text{مقدار التصحيح} = \frac{\text{مجموع المساحات العلويه} - \text{مجموع المساحات التحتيه}}{\text{طول الخط } (L)}$$

يمكن شرح هذه الطريقة بالرجوع الى الشكل (12-9) والذي يمثل سطحاً ذو نتوءات مثلثه الشكل.




الشكل (12-9) تصحيح المكان المخمّن لخط المركز لهيئة سطح منتظمة.

ولنفرض ان خط الوسط المخمّن مرسوم على مسافة $\frac{h}{4}$ من القمم. عندئذٍ يكون مجموع المساحة فوق الخط المخمن

$$A_2+A_1 =$$

$$2\ \frac{h}{4}\cdot\frac{b}{4}\cdot\frac{1}{2} =$$

$$\frac{hb}{16} =$$

أما مجموع المساحة تحت الخط المخمن = $A_4 + A_3$

$$\frac{9hb}{16} = 2\ \frac{3h}{4}\cdot\frac{3b}{4}\cdot\frac{1}{2} =$$

فالتصحيح = $\frac{\text{المساحة العلوية – المساحة التحتية}}{\text{طول الخط}}$

$$= \frac{\frac{9hb}{16} - \frac{hb}{16}}{2b} = -\frac{h}{4}$$

اي ان مسافة التصحيح التي يجب ان يزاح بها اثر خط الوسط هي $\frac{h}{4}$ الى الاسفل (وهذا ما تعنيه العلامه السالبه، أما إذا كانت القيمة موجبه فيعني ان الخط يجب ان يزحف الى الاعلى).

وهذا يجلب الخط الى المسافة $\frac{h}{2}$ من بداية القمم والذي سيكون عند وضعه المضبوط.

ان هذه العملية صحيحه من الناحية الهندسية للشكل المنتظم من هذا النوع وهي تقريباً صحيحه للشكل غير المنتظم من النوع الذي يصادفنا في تسجيل تضاريس السطح.

ان التقنية التي تم شرحها آنفاً هي تلك التي يلزم اجرائها في حالة استخدام جهاز توملنسن . اما مقياس التيليسيرف (Talysurf) الاعتيادي فيتضمن دائرة الكترونية تكاملية هي التي تقوم بهذه المهمة اثناء سحب المجس على طول السطح.

## ٥-١٢ مجهر التداخل الضوئي (The Interference Microscope)

لو وضع مسطح ضوئي* (optical flat) بزاوية صغيرة على سطح عاكس مسطح، ثم تضاء المنظومة بحزمة ضوئية متوازيه احادية الطول الموجي فسوف تشاهد أهداب التداخل (interference fringes) عبر السطح. يعتبر انعطاف هذه الاهداب كمقياس لتسطح السطح وإذا كان الطول الموجي للضوء المستخدم معلوماً فيمكن عندئذ معرفة التسطح والى درجة عالية من الدقة. فلوتأملنا التأثير الحاصل في منظر سطح يحتوي على اخدود على شكل الحرف (V) وبعمق 0.1µm وواقع تحت المسطح الضوئي وباستخدام حزمة ضوئية ذات طول موجي مقداره 0.5µm. فسيشير مقدار عدم الانتظام في نمط اهداب التداخل الى عمق الاخدود كما هو مبين في الشكل (12-10) .

تمثل المسافة بين الاهداب التغير في المسافة بين السطح و المسطح الضوئي لنصف طول موجي $\frac{\lambda}{2}$ .

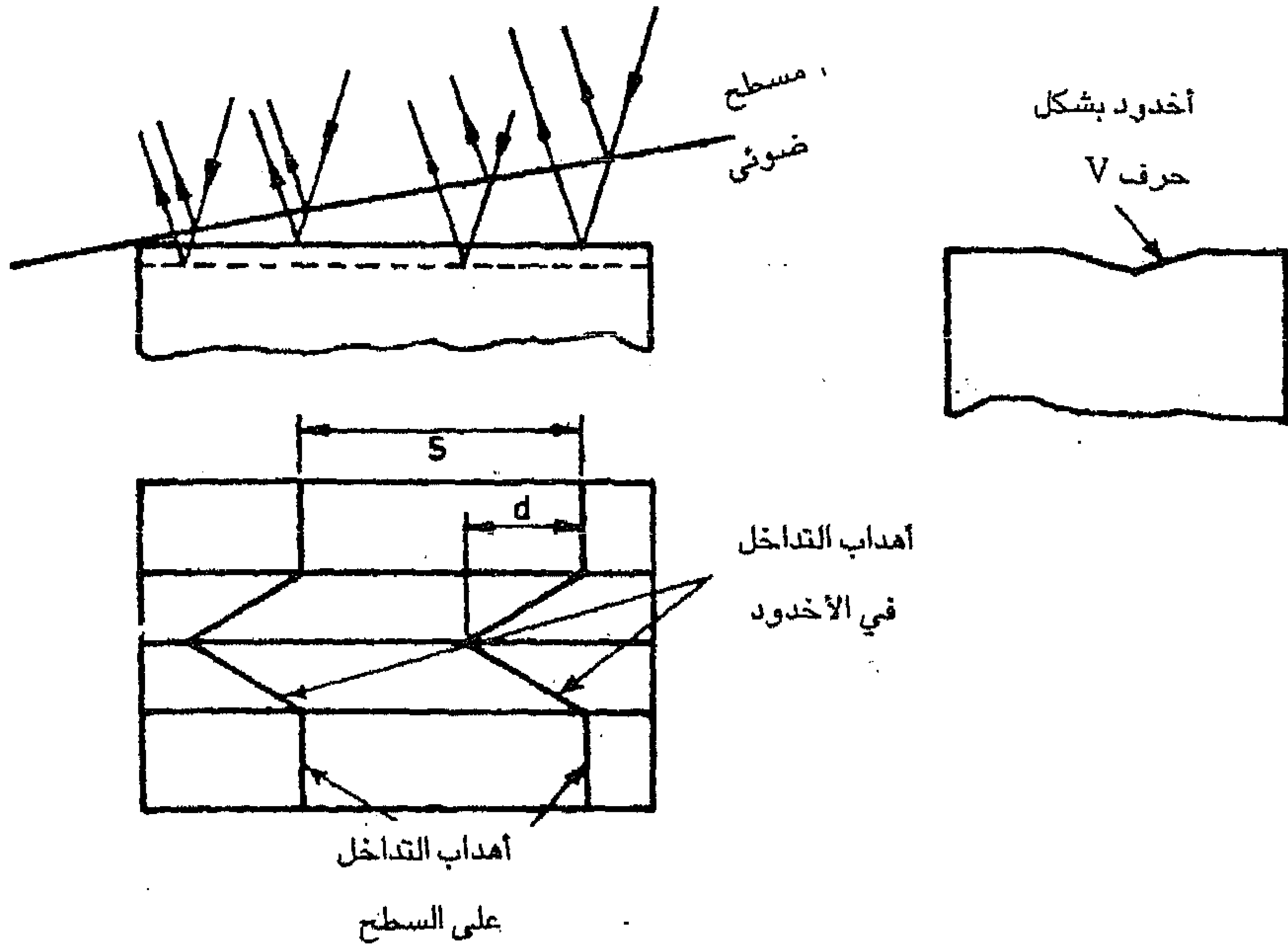
اذن عمق الاخدود = $\frac{d}{s} \times \frac{\lambda}{2}$

وفي هذه الحاله فإن العمق = 0.1 mm

و . $\lambda = 0.5\ \mu m$ اذن: $\frac{d}{s} = \frac{0.1}{0.25} \times \frac{0.5}{2}$

---

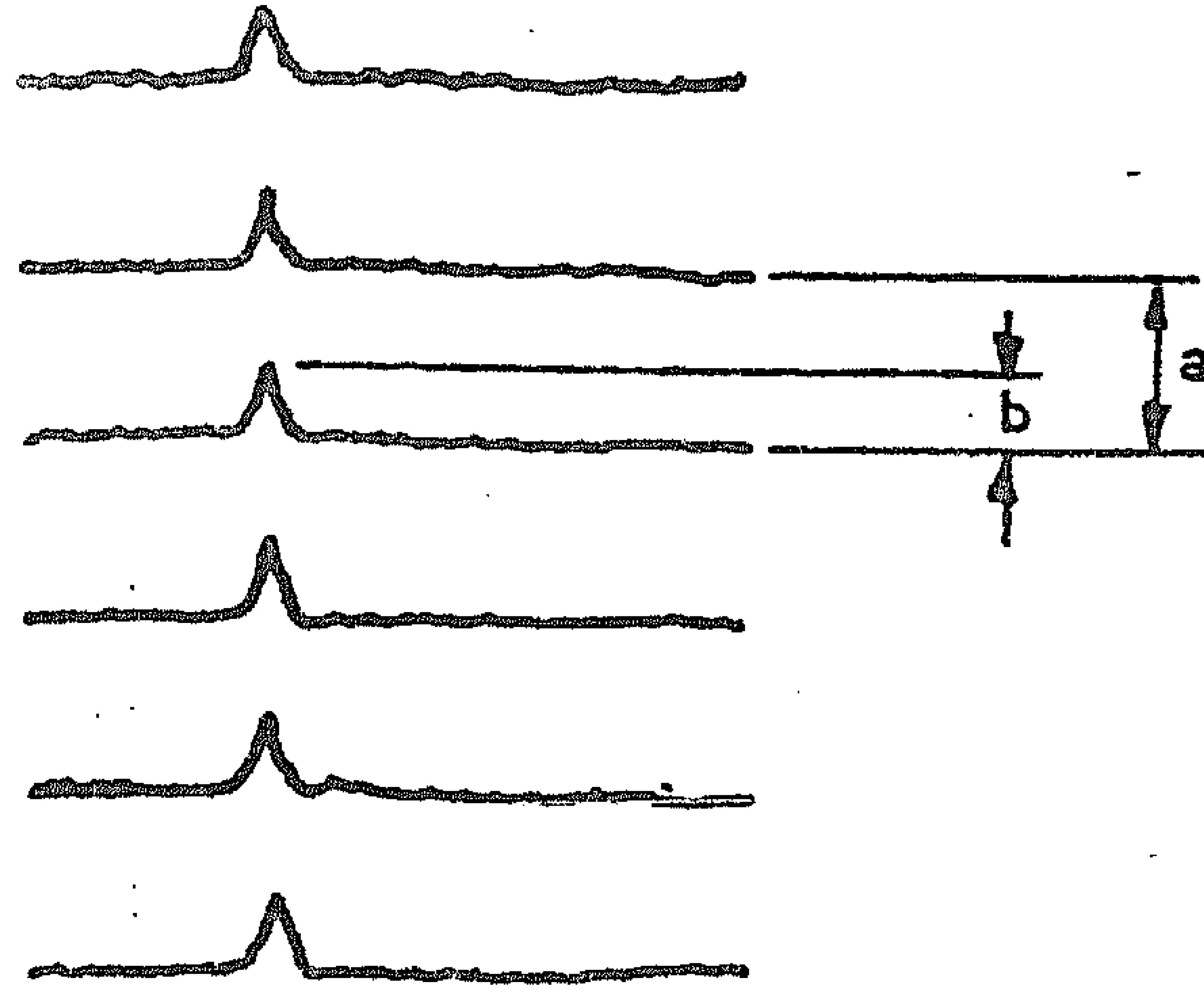
* المسطح الضوئي هو قرص زجاجي خال من الاجهادات . أحد وجهيه اوكلاهما منعّم ومصقول وملمع الى درجة من التسطح (flatness) لا تتوفر عادة في السطوح الهندسية. لذلك يعتبر المسطح الضوئي مصدر قياسي للتسطح ولهذا يقارن تسطح السطوح الهندسية به. يتراوح قطره بين 50 الى 300mm اما سمكه فهو 50mm تقريباً لاكبر قطر.




**شكل (10-12) اهداب تداخل عبر سطح مسطح يتضمن اخدود غير عميق على هيئة (V) وعلى طول السطح.**

وهذا يعني ان عدم الانتظام في الاهداب المعبر عنه بجزء من المسافة الفاصلة بين هدبين، يشير الى عمق عدم الانتظام في السطح بدلالة نصف الطول الموجي للضوء المستخدم.

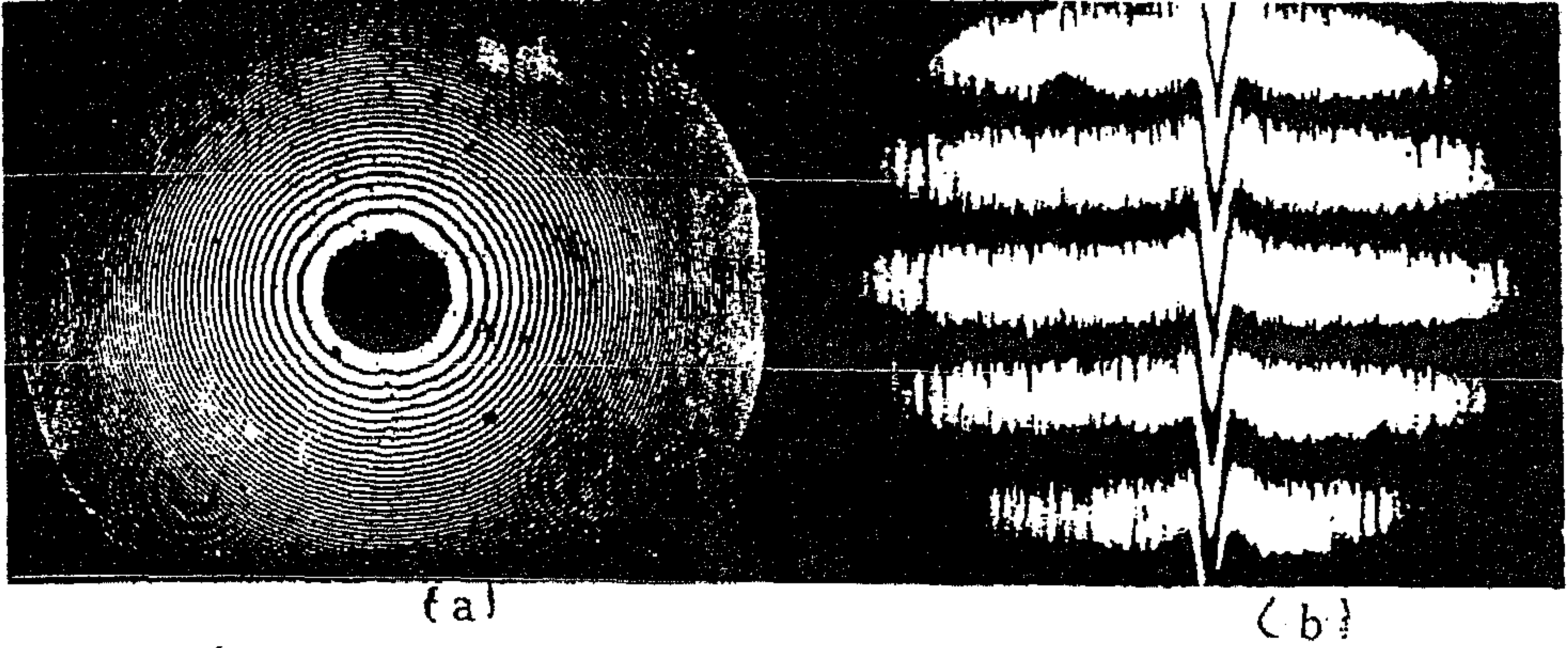
ويظهر السدنج، كما مبين في الشكل (11-12)،بصوره عامه له مسافة بين الاهداب تساوي (a) ويظهر الخدش (الاخدود) كما يبدو وكعدم انتظام في الاهداب وان له ارتفاع مقداره (b) .




**شكل (11-12) شكل نمط الاهداب الذي يُظهر خدش في السطح المسطح . يبدو في الشكل (11a-12) نمط مجهري حقيقي لاهداب مثل هذا السطح.**

يكون عمق الشق اذن مساوياً للمقدار ($\frac{\lambda}{2}$ $\frac{b}{a}$ ) مايكروميتر حيث تمثل $\lambda$ طول موجه الضوء المستخدم.

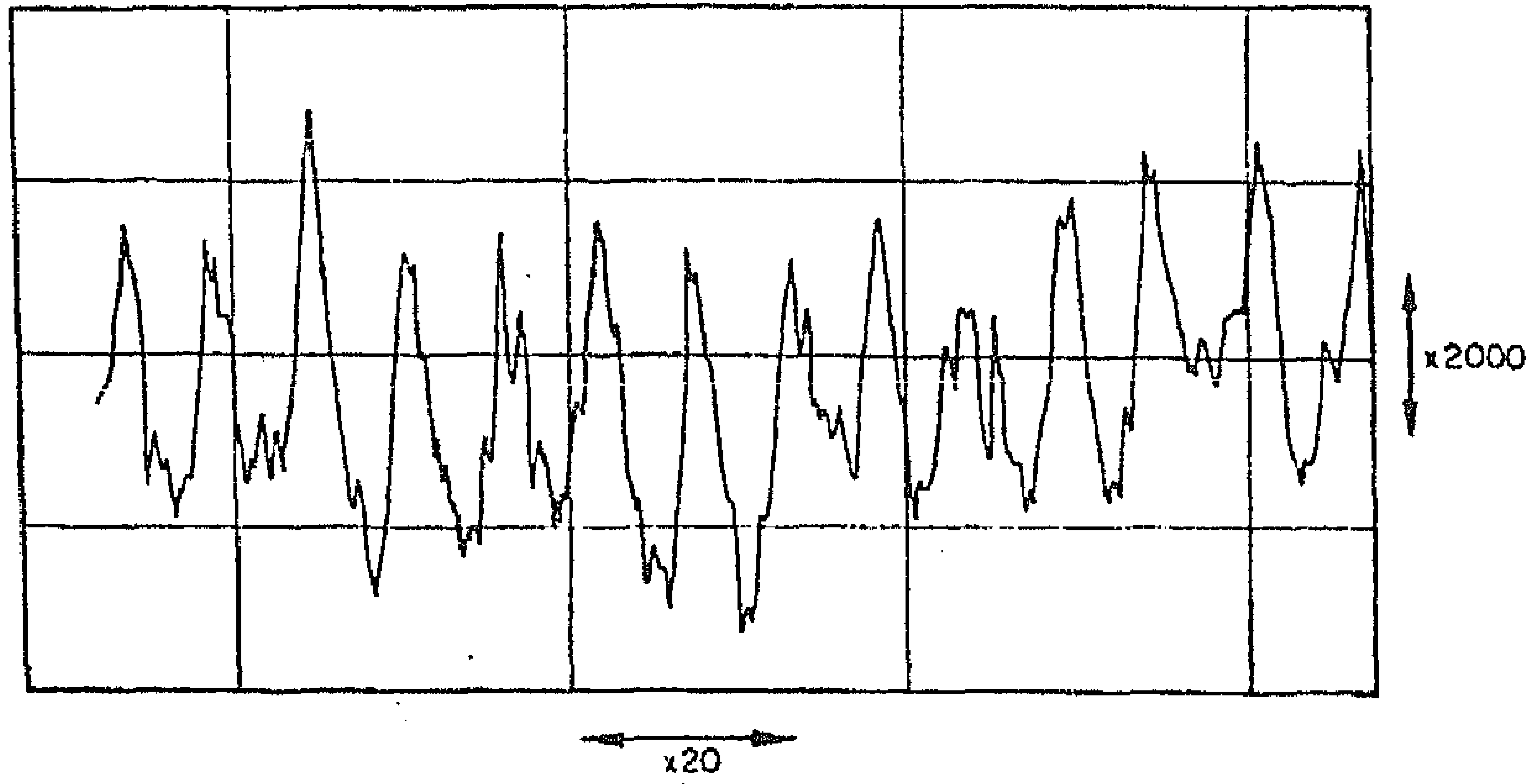
ان هذا الاسلوب في القياس لايمكن تحقيقه بمنظومة المسطح الضوئي الاعتياديه فهو يتطلب زاويه كبيره نسبياً لوضع المسطح الضوئي لتعطي اهداباً ضيقة (نحيفه جداً ومجهراً له قدرة تمييز عاليه (High resolving power) ليمكننا رؤية الاهداب . ان مثل هذا الترتيب يمكّن من مشاهدة انظمة التداخل لسطوح الكرات الفولاذية . حيث يشير مقدار استدارة الاهداب الى مدى كروية الكرات واي عدم انتظام في سطحها سيظهر كعدم انتظام في اهداب التداخل. وهناك مجهر للتداحل الضوئي ملائم لهذا النوع من الاعمال يمكن تزويده بآلة تصوير(Camera) ليمكن تسجيل صور دائمه للأهداب. والشكل (12-12 (a) و (b) ) يبين صورتي أهداب مأخوذة بمثل هذا الجهاز.



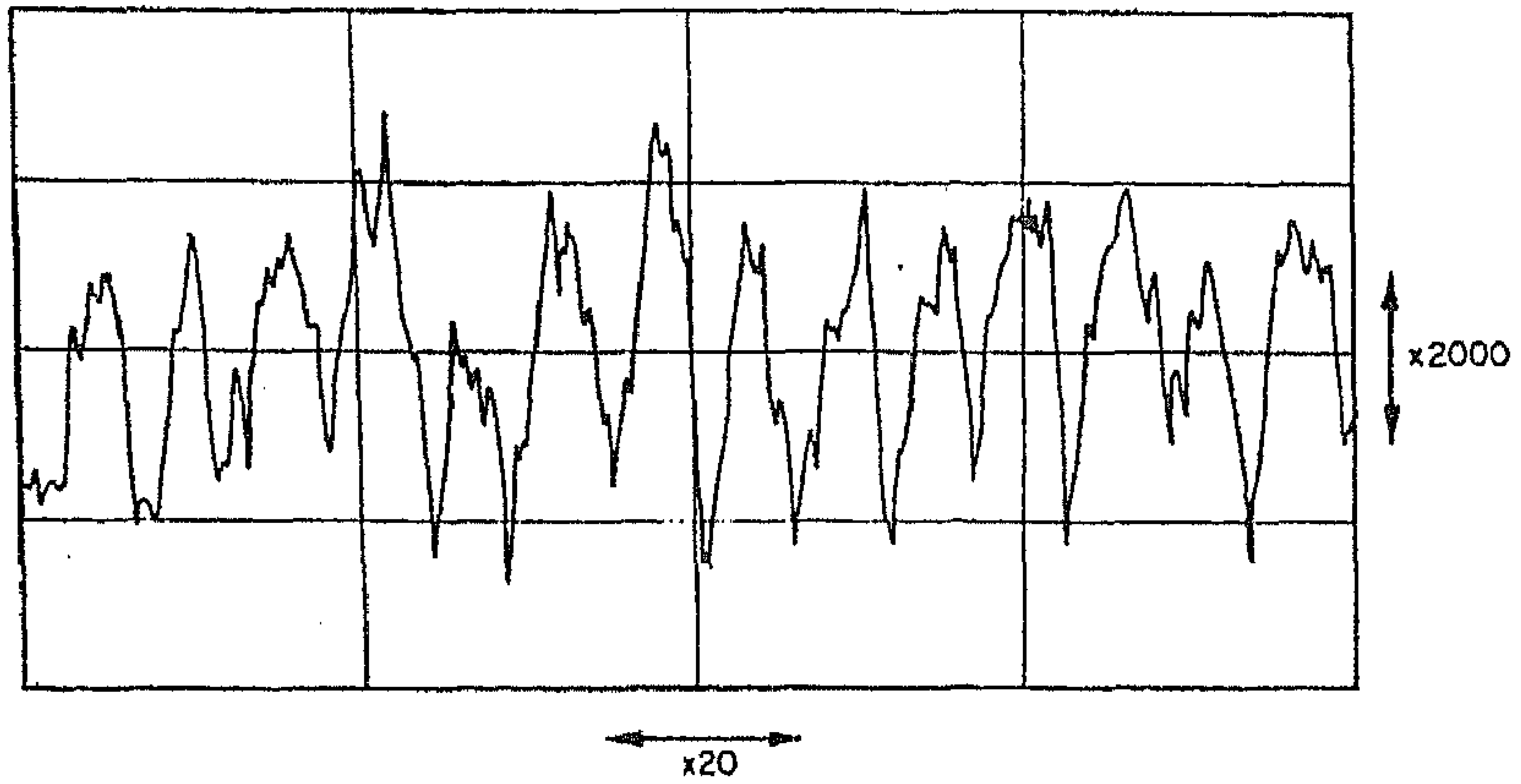

الشكل (12-12) نمط الاهداب المجهرية في (a) لسطح كرة فولاذية و(b) لخدش على سطح مسطح عمقه $\frac{\lambda}{2}$ او حوالي 0.25 µm .

## ٦-٢-١٢ طرائق النسخ (الطبعة )(Replica Methods):

يراد في الكثير من الحالات معرفة نسنج (تضاريس ) السطح لجزء ما إلا انه لايمكن لمجس الجهاز الوصول اليه وقياسه كما أنه غير عاكس بصوره كافية في اغلب الاحيان، وبذلك يكون غير ملائم لاستخدام طرائق التداخل الضوئي في القياس، وللتغلب على ذلك من الممكن غالباً الحصول على أثر السطح باستخدام اسلوب نسخ السطح . يتم في الأساس تنفيذ هذا الاسلوب بترطيب قطعة من غشاء (رقائق) مادة استات السيليلوز (Cellulose -Acetate) في الاسيتون لتليينها ثم ضغطها على السطح حتى تتصلد، وبهذه الطريقة يمكن الحصول على نسخة طبق الاصل وبدقة تصل الى حوالي 80%. يستخدم في التقنيات الحديثة راتنج الايبوكسي (Epoxy Resin) و راتنجات أخرى لتصل دقة النسخ الى 100% . يبين الشكل(2-13 (a) و (b)) اثرين لنفس السطح أحدهما مأخوذ من السطح الحقيقي مباشرة والاخر من طبعة الاستنساخ على التعاقب.




شكل (12-13a) اثر السطح المباشر. تقدر قيمة معدل خط المركز (C.L.A) بمقدار 3.65µm




شكل (12-13b) اثر طبعة (نسخ) السطح. تقدر قيمة معدل خط المركز (C.L.A) بمقدار 3.45µm

ويوضح الشكل (12-17) كيفية وضع الرمز الدال على دقة انهاء السطح للسطوح المختلفة لاحد الاجزاء المشكلة.

| الرمز | يعني الرمز | مثال |
|---|---|---|
| = | اتجاه مخطوط التغذية موازي للخط الممثل للسطح المعني بعلامة درجة التشطيب. | إتجاه خطوط التغذية |
| ⊥ | اتجاه خطوط التغذية متعامدة مع الخط الممثل للسطح المعني بعلامة درجة التشطيب | إتجاه خطوط التغذية |
| X | اتجاه خطوط التغذية مائلة في كل من الاتجاهين على الخط المائل للسطح المعني بعلامة درجة التشطيب | إتجاه خطوط التغذية |
| ع | خطوط التغذية لها عدة اتجاهات | ع |
| O | خطوط التغذية تقريباً دائرية بالنسبة لمركز السطح المعني بعلامة درجة التشطيب | O |
| نق | خطوط التغذية تقريباً نصف قطرية بالنسبة لمراكز السطح المعني بعلامة درجة التشطيب | نق |

**شكل (12-14) الرموز المستخدمة في توصيف اتجاه خطوط التغذية حسب طريقة التشغيل.**

## ٧-١٢ الرموز المستخدمة في توصيف درجة الانهاء السطحي:

**(The Representation Used in the Description of Surface Finish)**

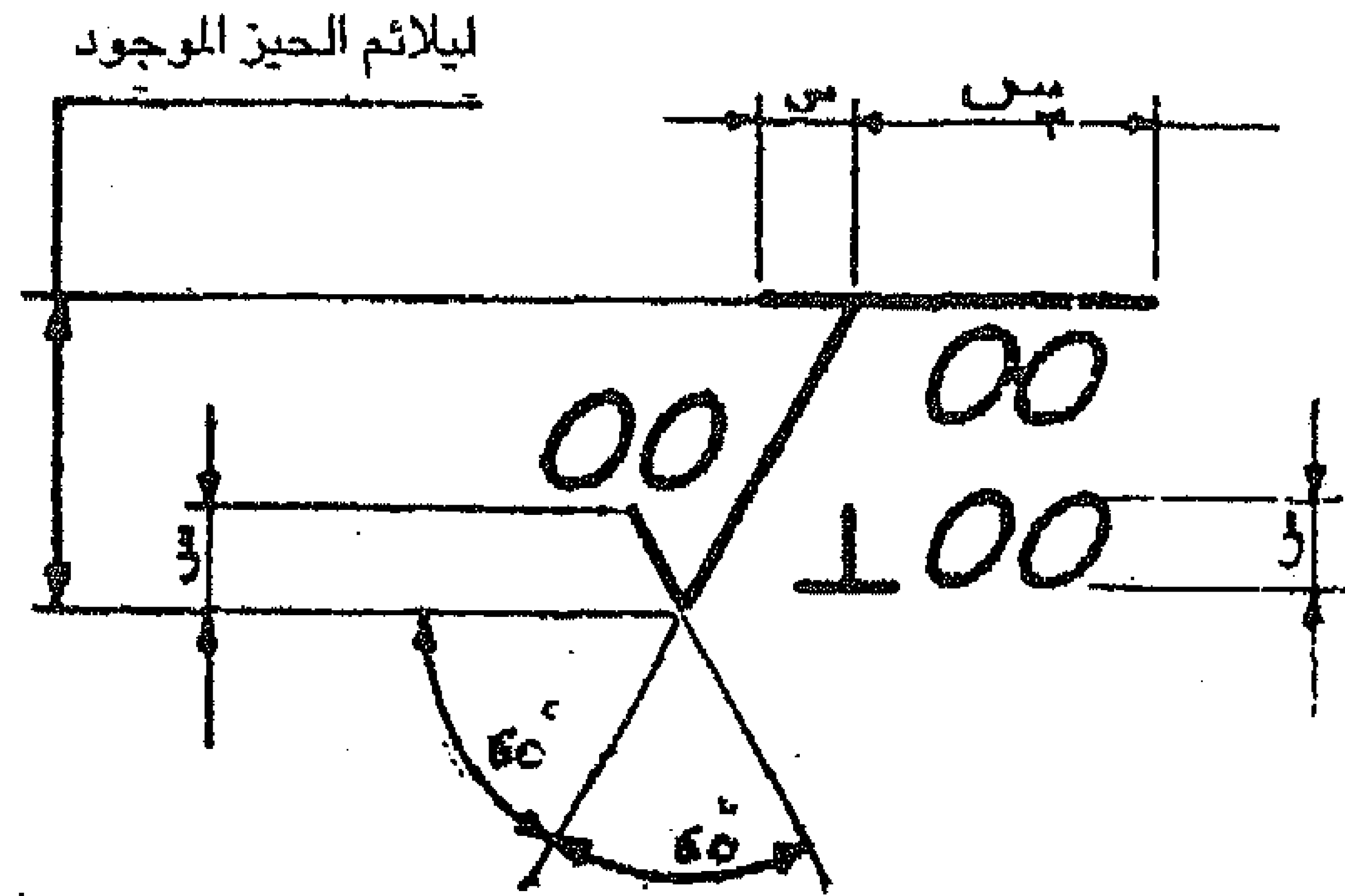
### أ- اتجاه علامات التغذية Direction of Feeding Traces

ان اتجاه علامات او آثار التغذية هوالطابع المميز لاتجاه تضاريس السطح الناتج عن طريقة التشغيل المستخدمة. يوضح الشكل (12-14) الرموز المستعملة لسطوح مشغلة لها خطوط تغذية مختلفة حسب طريقة التشغيل.

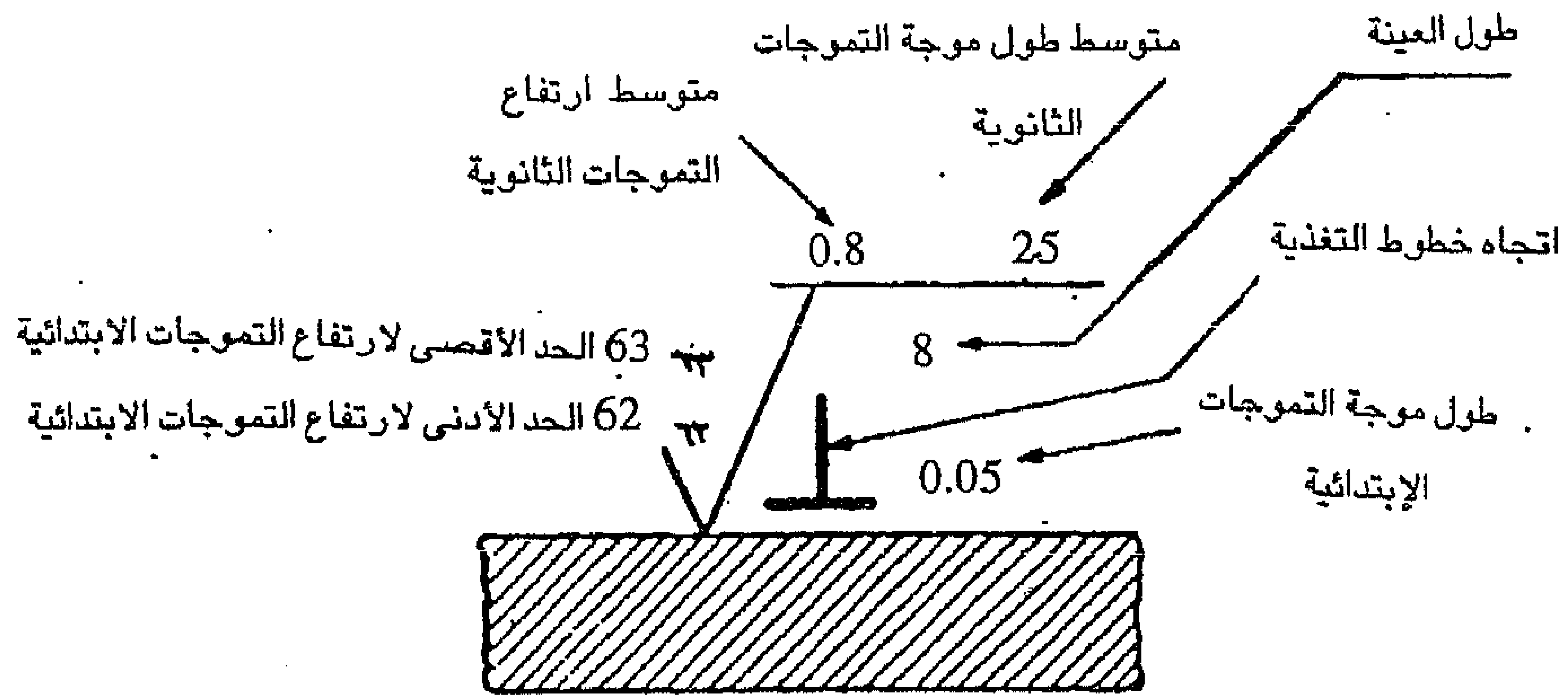
### ب- كيفية كتابة ووضع الرموز على الاجزاء المشغلة:

**(The way of writting the representation on the finished components)**

يستعمل الرمز المبين في الشكل (12-15) في توصيف تضاريس السطح موضحاً عليه المقاسات القياسية. اما الشكل (12-16) فيبين مثالاً لاسلوب توصيف درجة انهاء السطح بالدلالات المختلفة.

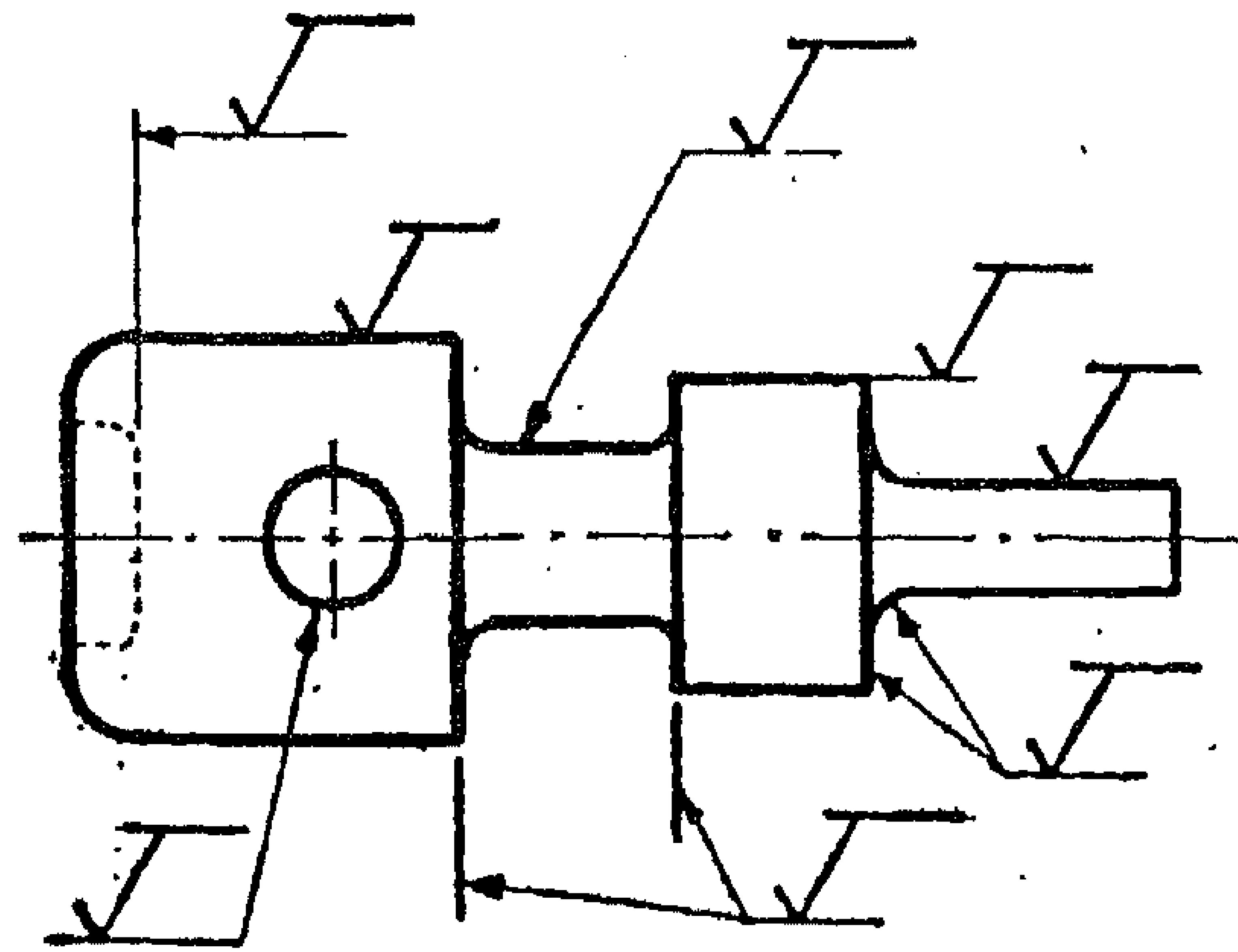



**الشكل (12-15) الرمز المستخدم في توصيف درجة انهاء السطح بالمقاسات النسبية**




**الشكل (12-16) طريقة توصيف دقة انهاء السطح.**

ويوضح الشكل (12-17) كيفية وضع الرمز الدال على دقة إنهاء السطح للسطوح المختلفة لاحد الأجزاء المشكلة.



**الشكل (12-17) كيفية وضع الرمز الدال على دقة الانهاء السطحي للأسطح المختلفة التشغيل.**

## ٨-١٢ مدى الانهاء السطحي الذي يمكن الوصول اليه بعمليات التشغيل المختلفة:

**(The Extent of possible surface finish that achieved by various machining processes)**

يبين الشكل (12-18) لوحة بيانات يظهر فيها مدى قيم الانهاء السطحي المتوقع الحصول عليها عادة بعد كل عملية تشغيل لاختيار أنسب عمليه تشغيل ملائمة للوصول الى درجة الانهاء المطلوبة.

### درجة تشطيب الاسطح الممكن الوصول اليها بعمليات التشغيل المختلفة

يوضح الرسم البياني مدى درجة التشطيب المتوقع الحصول عليها عادة من كل عملية تشغيل وهو يرشد كلاً من المصمم وعامل التشغيل في اختيار انسب عملية تشغيل لازمة للوصول الى درجة تشطيب معينة.

| درجة تشطيب السطح ع (ميكروميتر) 0.025 | 0.05 | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.8 | 1.6 | 3.2 | 6.3 | 12.5 | 25 | عمليات التشغيل أو التشطيب | [illegible] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | | | القطع باللهب أو المنشار | [illegible] |
| | | | | | | | | | | | المبرادة اليدوية | |
| | | | | | | | | | | | خراطة وكشط وتفريز | |
| | | | | | | | | | | | الثقب | |
| | | | | | | | | | | | خراطة التجويف | |
| | | | | | | | | | | | توسيع بالبرغل | |
| | | | | | | | | | | | تجليخ سطحي | |
| | | | | | | | | | | | تجليخ اسطواني | |
| | | | | | | | | | | | صقل | |
| | | | | | | | | | | | تلميع | |
| | | | | | | | | | | | تشطيب فائق الدقة | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | سباكة في الرمل | [illegible] |
| | | | | | | | | | | | تشكيل بالحدادة | |
| | | | | | | | | | | | السباكة في قوالب | |
| | | | | | | | | | | | أسطح مدلفنة | |
| | | | | | | | | | | | الصب في قوالب | |
| | | | | | | | | | | | التشكيل بالبثق | |
| | | | | | | | | | | | | |

شكل (12-18)

درجات انهاء (تشطيب) الاسطح التي يمكن الوصول اليها بعمليات التشغيل المختلفة.

# تمارين الفصل الثاني عشر

١- بين كيف يؤثر نسيج السطح على الخواص الميكانيكية للجزء.

٢- عرّف الخشونة وميّز بينها وبين التموج وماهي اسباب نشوء كل منهما.

٣- عدد طرائق قياس الخشونة واشرح واحده منها باختصار.

٤- ماهي الاجزاء الرئيسه لأجهزة مقاييس خشونة السطح وماهي أسس عملها؟

٥- ماهو المسطح الضوئي وماهي الغاية من استخدامه؟

٦- اشرح كيف يمكن استخدام طريقة التداخل الضوئي لمعرفة ماهية السطح.

٧- لماذا تقاس خشونة السطح في بعض الاحيان باستخدام طريقة نسخ السطح وكيف يتم ذلك.

# المصادر

1- Methals Handbook, vol.11"Nondestructive inspection and quality control" 8th ed .American Society of Metals (ASM)1976 .

2- McMaster R.C.,Ed."Non destructive Testing Handbook", vol. 1 and vol.2. The Ronald press company,1959.

3- Mc Gonnagle W.J., "Nondestructive Testing" McGraw Hill Book company Inc. 1961 .

4-Hull B.and John V. "Nondestructive Testing " 1 st ed. MaCmillan Education Ltd., 1988 .

5- Birchon D.,"Nondestraclive Testing", Published for the design council,The British Standards Institution and The council of Engineering Institution by Oxford University press,1975 .

6- The Institution of Metallurgists,"Ultrasonic Nondestructive Testing"Monograph 9, The Chameleon press Ltd . 1984 .

7- Cullity B.D., "Elements of X-Ray Diffraction "Addison Wsley publishing company. Inc. 1978 .

8- Barrett C. and Massalski T.B., "Structure of Metals" McGraw - Hill. Inc. 1966 .

9- Klyg H.P.and Alexander L.E.,"X-ray Diffraction Procedures" 2nd ed., Wiley Interscience pub. 1974.

10- Murr L.E., "Electron Optical Application in Material Science" McGraw-Hill, Inc.1970 .

11- Bowen D.K.and Hall C.R., "Microscopy of Materials" Macmillan Press Ltd 1975 .

12- Edington J.W., "The Operation And Calibration of The Electron Microscope "Philips Technical Library, Monogtaph 1. The Macmillan Press Ltd., 1975 .

13- Edington J.W., "Electron Diffraction in the Electron Microscope" "Philips Technical Library,Monograph 2,The Macmillan press Ltd., 1975 .

14- Edington J.W." Interpretation of transmission Electron Micrographs" Philips Technical Library, Monograph 3, The Macmillan Press Ltd., 1975.

15- Edington J.W." Typical Electron Microscopy Investigations" Philips Technical Library , Mongraph 4, The Macmillan Press Ltd., 1975 .

16- Holt D.B., Muir M.O., Grant P.R.and Boswarva I.M., "Quantitative Scanning Electron Microscopy" Eds.Academic Press Inc. (London)Ltd.2nd Printing 1976 .

17- Kay D.Ed."Techniques for Electron Microscopy" 2nd ed. Blackwell Scientific Publication Ltd.1965 .

18- DeHoff R.T.and Rhines F.N., "Quantitative Microscopy" McGraw-Hill Book co.1968 .

19-ASTM STP 504 ,"Stereology and Quautitative Metallography" 1970 .

20- Vander Voort G.F., "Metallography- principles and practice"McGraw-Hill Book Co., 1984 .

21- Smallmann R.E.and Ashbee K.H.,"Modern Metallography" Pergamon Press 1969 .

22- Raghavan V.,"A First Course In Materials Science" Prentice- Hall of India Private Lted., New Delhi,2nd ed.,1982 .

23- Blitz J., King W.G.and Donald G.,"Electrical.Magnetic and Visual Methods of Tesing Materials Butterwoths, 1969.

24- Davies D.J. and Oelmann L.A., "The Structure,Properties and Heat treatment of Metals",Pitman,1983.

25-Higgerson C.A.Ed.,"Experiments in Materials Technology" Affiliated East -West Press PVT.Ltd.New Delhi,1973 .

26- Dieter G.E., "Mechanical Metallurgy"2nd ed., McGraw-Hill Inc.1976 .

27- Rollason E.C., "Metallurgy for Engineers" 4th ed .Edward Arnold (Publishers)Ltd.1980 .

28- Higgins R.A., "Enginnering Metallurgy -Part I Applied physical Metallurgy", 5th ed., Hodder and stoughton Ltd., 1983 .

29- Higgins R.A., Properties of Engineering Materials", Hodder and stoughton Ltd., 1977 .

30- AL- Haidary,"Progress of Vanadium Carbide in Low Alloy steel as Determined by Electrical Resistivity and Electron Microscopy Measurments," J.of Engin.and Tech., vol.10 No.2 pp 8-28,1991 .

31- Mc Gee T.D., "Principles and Methods of Temperature Measurement"John Wiley and Sons,1988 .

32- Yarwood J., "High Vacuum Technigue" 4 th ed. Chapman and Hall Ltd.1975 .

33- Holland L., "Vacuum Deposition of Thin films, Chapman and Hall Ltd., 1970 .

34- Dieter G., "Engineering Design,A Materials and Processing Approach", Mc Graw-Hill Inc.1983 .

35-Wannacott R.J.and Wonnacott T.H., "Statistics,Discovering Its Power",John Wiley and Sons ,1982 .

36-Gupta R.C. "Engineering Manufacturing and statistical Quality Control", Khann Pub.3rd . 1983 .

37- American Welding Society (AWS),Welding Handbook vol. 5, "Engineering,Costs,Quality and Safety "Kearns W.H., Ed., 1984 .

38-Galyer J.F. & Shotbolt C.R., "Metrology For Engineers"A Cassel Technical book, London,1979 .

39- Matt S.R."Electricity and Basic Electronics" Pub . The Coodheart-Willcox company,Inc.Illinos.1998 .

٤٠- فيزياء الحيود، د. سامي مظلوم صالح، الجامعة التكنولوجية ١٩٨٢ .

٤١- تكنولوجيا القياس والمعايرة، سامي محمود الخضري ، ط ١ ، مكتبة الانجلو المصرية، ١٩٦٨ .

# المصطلحات العلمية ومايقابلها بالعربية

## A

| | |
|---|---|
| absorption contrast | التباين بالإمتصاص |
| absorption edge | عتبه الامتصاص |
| absorption | امتصاص |
| aberration | زيغ |
| accelerators | معجلات |
| acceleration | تعجيل |
| accuracy | دقة، ضبط |
| acoustic impedance | ممانعة صوتيه |
| activty | نشاط (فعالية) |
| achromatic | لالوني |
| advertising costs | كلف الاعلانات |
| attenuation | توهين |
| alternating current | تيار متناوب |
| alternating stress | اجهاد متناوب |
| amplitude | سعة الموجة |
| ampere | أمبير |
| amplification | تضخيم ، تكبير |
| amorphour | لابلوري |

| | |
|---|---|
| anode | مصعد |
| analysis | تحليل |
| annealing | تلدين |
| automatically | الياً |
| aplanatic point | النقطة المسوّية |
| aperture | فتحة |
| airframe | بدن الطائرة |
| avalanche ionization | تأين التيهور (التأين المفاجئ الضخم) |
| areal fraction | كسر مساحي |
| associated waves | امواج مرافقه |
| associated wavelength | الطول الموجي المرافق |
| astigmatism | اللابؤريه |
| atomic packing factor | معامل التراص الذري |
| atomic scattering factor | معامل الاستطارة الذري |
| atomic number | العدد الذري |
| atomic plane | مستوى ذري |
| atmospheric pressure | الضغط الجوي |
| atmosphere | جو |
| Auger microscope | مجهر اوجر |
| average | المعدل الجيري |

# B

| | |
|---|---|
| back scattered electrons | الكترونات مستطارة رجوعاً |
| ballast resistance | مقاومة الموازن |
| baffle | كابح |
| baffle value | صمام كابح |
| ball bearings | مرتكزات كروية |
| bar chart | لوحة الاعمدة |
| barrel distortion | تشويه البرميل |
| beam | شعاع، حزمة من شعاع |
| betatron | جهاز معجل الالكترون |
| biology | علم الاحياء |
| binary alloy | سبيكة ثنائية |
| bias | تحيز ، انحياز |
| black body | الجسم الاسود |
| blurring | عدم وضوح |
| bond | آصره، رابطة |
| body centerd-cubic | مكعب متمركز الجسم |
| boundaries | حدود |
| braces | أقواس كبيره { } |
| brass | شبه ،نحاس أصفر |
| brittleness | هشاشية |

# C

| | |
|---|---|
| camera | آلة تصوير (كاميرا) |
| capture | أسر |
| calibration | معايرة |
| cantilever | حَيْد ،عتلة |
| carbon replica | طبعة كاربونية |
| carburizing | كربنه |
| carburized Layer | طبقة مكربنه |
| cast iron | حديد الزهر |
| categories | أصناف ، فئات |
| cathodoluminescence | الاضاءة المهبطية |
| capture cross section | المقطع العرضي للأسر |
| ceramics | خزفيات |
| charateristic X - rays | الاشعة السينية المميزه |
| chart recorder | راسم بياني |
| characteristic radiations | اشعاعات مميزة |
| chance | صدفة |
| chemical composition | تكوين كيماوي |
| chromatic aberration | الزيغ اللوني |
| circular | دائري |

| | |
|---|---|
| coating | طلاء، عمليه طلاء |
| cassette | علبة فلم، حافظة فلم |
| class | فئة، صنف |
| confidence curves | منحنيات الثقة |
| class intervals | فواصل الفئات |
| coil impedance | ممانعة الملف |
| coil conductance | توصيل الملف، توصيلية الملف |
| conductance | توصيل، توصيلية |
| conductors | موصلات |
| conduction | توصيل |
| constitution | تكوين |
| conductivlty | توصيلة |
| cracks | شقوق |
| confusion | تشويش |
| coefficient | معامل، دليل |
| continuous radiation | أشعة مستمرة |
| crystal | بلوره |
| crystallography | علم البلورات |
| cystallographic axes | المحاور البلوريه |

| | |
|---|---|
| coherent | متوافقة، متلاحمة |
| cubic | مكعب الشكل |
| complex number | عدد مركب |
| crucible | بوتقه |
| counter | عداد |
| constant volume gas thermometer | محرار غاز الحجم الثابت |
| composite materials | مواد مركبة |
| crayons | اقلام ملونه |
| cones | مخاريط |
| cold junction | نقطة الربط البارده |
| cost | كلفة |
| compensating leads | أسلاك توصيل معادلة |
| corrosion | تآكل |
| corrosion - fatigue | كلال تآكلي |
| cold shuts | عدم تلاحم بارد |
| crank shaft | عمود مرفقي |
| coil | ملف |
| compressibility | الانضغاطية |
| curvature of field | انحناء المجال |

| | |
|---|---|
| crown glass | زجاج التاج |
| concrete | خرسانه |
| creep | زحف |
| cyclic stress | اجهاد دوري |
| cup dome | قبة القدح |
| carbide | كاربيد |
| casting | سباكه |
| contact | تماس |
| copper | نحاس |
| cooling | تبريد |
| curves | منحنيات |
| cyclic | دوري |

## D

| | |
|---|---|
| damage | تلف |
| deterioration | تدهور |
| decay | اضمحلال |
| disintegration | انحلال |

| | |
|---|---|
| direct | مباشر |
| direct current | تيار مباشر |
| diffraction | حيود |
| diaphragm | حجاب |
| depth of field | عمق المجال |
| denth if focus | عمق التبئر |
| diffractometer | محياد |
| diffrentiation | تفاضل |
| deceleration | تباطؤ، تقصير |
| detector | كاشف |
| dislocation | انخلاعه |
| diffusion | انتشار |
| ductile | مستمطل |
| device | جهاز، اداة |
| degree of freedom | درجة الحرية |
| diffusion pumps | مضخات انتشاريه |
| dynamic systems | اجهزة حركية |
| desorption | المج |
| detector | كاشف |

| | |
|---|---|
| direction | اتجاه |
| diamond | ماس |
| diagonal length | طول المحور |
| deflection | انحراف |
| ductility | مطيليه |
| dial gauge | مقياس قرصي |
| design | تصميم |
| dispersion | تشتيت |
| deviation | انحراف |
| detection | كشف |
| dry | جاف |

## E

| | |
|---|---|
| Eddy currents | تيارات دوّامه |
| electron gun | قاذف الكتروني |
| emission | انبعاث |
| edge dislocation | انخلاعه طرفيه |
| etching | اظهار، تنميش |

| | |
|---|---|
| extracting surface replicsa | طبعة استخلاص سطحية |
| electrodepostion | ترسيب كهروكيميائى |
| electrical signal | إشارة كهربائية |
| evaporation | تبخير |
| electron prope micro analyser | محلل المجس الالكتروني الدقيق |
| energy dispersive spectrometer | المطياف المفرق للطاقه |
| environmental studies | دراسات بيئيه |
| equiaxed grains | حبيبات متساوية المحاور |
| equilibrium | اتزان |
| emissivity | الانبعاثية |
| eyepiece lens | عدسه عينيه |
| excitation | تهيج |
| exciting current | التيار المهيج |
| energy barrier | حاجز الطاقة |
| electrostatic field | مجال كهربائي مستقر |
| elastic behaviour | سلوك مرن |
| energy | طاقة |
| embrittlement | هشاشيه |
| endurance limit | حد التحمل، حد الصمود |

| | |
|---|---|
| electrolyte | منحل كهربائي |
| event | حادثه |
| exclusive events | حوادث متنافيه |
| extreme value | قيمه متطرفه |
| ellipse | شكل اهليجي |

## F

| | |
|---|---|
| factor | عامل |
| fatigue | كلال |
| fill factor | عامل الملء |
| fast neutrons | نيوترونات سريعة |
| fluorescent material | ماده متألقه |
| focus | بؤره |
| focusing | تبئير |
| focal length | البعد البؤري |
| filament | شعيره |
| features | معالم |
| filter | مرشح |

| | |
|---|---|
| fluorescent screen | شاشة متألقه |
| face - centered cubic | مكعب متمركز الوجه |
| flash light | ضوء ومضي |
| frequency | تردد ، تكرار |
| fracture | كسر |
| fracture toughness | متانة الكسر |
| fused silica | سليكا نقيه |
| fire bricks | طابوق ناري |
| floppy disk | قرص مرن |
| free electrons | الكترونات حرة |
| field | مجال |
| Fermi level | مستوى فرمي |
| flux | فيض |
| film | غشاء |
| flint glass | زجاج الصوان |
| field emission microscope | مجهر انبعاث المجال |
| field ion microscope | مجهرايون المجال |
| fringes | اهداب |
| flange | شفه |

| | |
|---|---|
| force | قوة |
| fluctuating stress | اجهاد متقلب |
| fatigue limit | حد الكلال |
| fatigue life | عمرالكلال |
| fluoroscopy | تقنية التألق |
| feed back | تغذية عكسية (مرتدة) |
| frequency diagram | مخطط تكراري |
| flaws | تصدعات |
| failure | فشل |

## G

| | |
|---|---|
| gap | فجوه فاصلة |
| gasket | حشيه |
| gas ballast | موازن الغاز |
| gauge length | مدلول الطول |
| games | العاب |
| galvanometes | كلفانومير،مقياس غلفاني |
| gamma rays | أشعة كاما |

| | |
|---|---|
| gauge | مقياس |
| gamma ray spectrometer | مطياف اشعة كاما |
| grains | حبيبات ، بلورات |
| grain size | حجم حبيبي |
| grinding | تنعيم |
| grating | محزز |
| grid | شبكة |
| geological research | بحث جيولوجي، بحث طبقات الارض |
| gun of electrons | قاذف الكترونات |

## H

| | |
|---|---|
| half- life | عمر النصف |
| hard X-ray | الاشعة السينيه الشديده |
| hardness | صلادة |
| hardening | تصليد |
| hexagonal close packed | سداسي متراص |
| histogram | مدرج تكراري |
| hot junction | نقطه الربط الحاره |

| | |
|---|---|
| hot | حار |
| hot stage microscope | مجهر المرحلة الحاره الضوئى |
| hot cathode ionization | المقياس الايوني للمهبط الساخن |
| hydrogen | هيدروجين |
| hydrogen embrittlement | الهشاشية المتسببة عن الهيدروجين |
| hydrostatic gauges | مقاييس هيدروستاتيه |

# I

| | |
|---|---|
| iris | قزحية |
| inductive reactance | المفاعلة الحثيه |
| inductance | محاثه حثيثه |
| inductor=inducer | مِحثّه ، حاثه |
| impedance | ممانعه كهربائية |
| insulators | مواد عازلة، عوازل |
| isotopes | نظائر |
| interference | تداخل |
| intermediate lens | عدسة وسطية |
| index | دليل ، تسمية |

| | |
|---|---|
| indices | ادلة |
| intermetallic compound | مركب كيماوي معدني |
| inclusions | اكتنافات |
| international Annealed Copper Standard | النحاس الملدن القياسي عالمياً |
| imperfection | خلل |
| image quality indicator | كاشف نوعية الصوره |
| infra-red radiation | اشعة تحت الحمراء |
| intensity | شدة |
| interstitial atoms | ذرات بينيه |
| indentation | أثر الغرز |
| internal cavities | فجوات داخليه |
| inspection | فحص |
| incidental sale | بيع طارئ |

# J

| | |
|---|---|
| jet water | ماء متدفق |
| jet electropolishing technique | تقنية الصقل الكهربائي بالتدفق |

## K

| | |
|---|---|
| kinetic energy | طاقة حركية |

## L

| | |
|---|---|
| lattice | شبيكه |
| lattice parameter | معلمه الشبيكة |
| lattice point | نقطة شبيكه |
| laser microprobe | مجس الليزر الدقيق |
| lamp | مصباح |
| lack of bond | عدم تمامية الترابط |
| laps | ثنيات |
| lateral expansion | تمدد جانبي |
| laminations | تصفيحات |
| lift off factor | عامل التباعد |
| lens | عدسه |
| lens stop | حابس العدسه |
| leakage magnetic flux | الفيض المغناطيسي المتسرب |
| liquid | سائل |
| liquid penetrant testing | الفحص بالسائل المتغلغل |

| | |
|---|---|
| limit of resolution | حد التمييز |
| least confusion circle | الدائرة الاقل تشويهاً |
| light elements | عناصر خفيفه |
| lineal fraction | كسر خطي |
| lime | كلس |
| longitudinal magnetization | تمغنط طولي |
| layer | طبقه |
| lead | رصاص |
| load | حمل |
| leakage | تسرب |
| low alloy steel | فولاذ منخفض السبيكه |
| lubrication | تزييت |
| lubricated indenter | اداة غرز مزيته |
| loading | تحميل |
| local extendion | استطالة موضعية |

# M

| | |
|---|---|
| magentization | تمغنط |

| | |
|---|---|
| magnetic flux | فيض مغناطيسي |
| magnetic induction | حث مغناطيسي |
| magnetic field strength | شدة المجال المغناطيسي |
| magnetic permeability | المنفذية المغناطيسية |
| magnetic susceptibility | المتأثرية المغناطيسية، القابلية على التمغنط |
| manometer | مضغاط انبوبي |
| mass production | انتاج بالجمله |
| magnetic saturation | التشبع المغناطيسي |
| mass | كتله |
| mass absorption coefficient | معامل امتصاص الكتلة |
| mean | وسط حسابي |
| mean free path | معدل المسار الحر |
| median | وسيط |
| mode | منوال، أسلوب |
| medium | وسط ،محيط |
| microscope | مجهر |
| maximum load | الحمل الأعظم |
| mismatch | عدم توافق |

| | |
|---|---|
| miniature | المصغر،نسخة مصغرة |
| misapplication | سوء التطبيق |
| microhardness | صلادة دقيقه |
| metal | معدن |
| minerals | خامات معدنية |
| mica | ميكا |
| miller indices | ادلة ملر |
| microstructure | بنيه دقيقه ، بنيه مجهرية |
| mechanisim | الية |
| mild steel | فولاذ مطيل |
| micro wave | الاشعة الدقيقة (الامواج الدقيقة) |
| moving mass | الكتلة الحركية |
| morphology | دراسة بنية الشيء |
| monochromatic | احادي الموجه |
| monoclinic | احادي الميل |
| momentum | زخم |
| modulation | تغيير، تعديل |
| muffle | لافح |
| multichannel analyzer | محلل القنوات المتعددة |

| | |
|---|---|
| moderator | معدِّل، مادة معدله، مهدئ |
| modulus | معيار |
| modulus of rigidity | معيار الجسوء |
| magnetostriction | التقبض المغناطيسي |

## N

| | |
|---|---|
| neuclear reactor | مفاعل نووي |
| neutron radiiography | تصوير أشعاعي نيوتروني |
| neutron | نيوترون |
| neutron irradiation | تشعيع نيوتروني |
| necking | تحضر |
| noise | ضوضاء |
| nominal stress | اجهاد اسمي |
| notch | حز، ثلمه |
| normal distribution | التوزيع الاعتيادي |
| non ferrous alloys | سبائك لاحديديه |
| null point | نقطة الخمود |
| nonprimitive cell | خليه غير اولية |

# O

| | |
|---|---|
| Oil dash- pot | نبيطه زيتيه |
| Ohm | اوم |
| occasional observations | المشاهدات العرضية |
| objective lens | عدسه شيئية |
| origin | نقطة الاصل، اصل |
| order | مرتبة، ترتيب |
| orientation | توجه، وضع |
| orthorhombic | معيني الشكل |
| oscillation | تذبذب |
| oscilloscope | منظار الذبذبات |
| orbital electrons | الكترونات مداريه |
| overlapping | تراكب |
| optical microscope | مجهر ضوئي |
| oblate | شبه كروي مفلطح |

# P

| | |
|---|---|
| parallelogram | متوازي أضلاع |
| parallelepiped | متوازي السطوح |

| | |
|---|---|
| parameters | معالم |
| parabola | قطع مكافئ |
| pattern | نمط |
| packing direction | اتجاه التراص |
| path | طريق ،مسار |
| parameter | مَعْلَمه |
| pellets | كريات |
| peak | قمة، ذروة |
| performance | اداء |
| periodic arrangement | ترتيب متكرر |
| penetration | اختراق |
| plastics | لدائن |
| pole piece | فتحة العدسه |
| phase contrast | التباين الطوري |
| phase | طور |
| primitive cell | خليه اوليه |
| point lattice | شبيكة نقطية |
| plate | لوح |
| photomultiplier | مضاعف فوتوني |

| | |
|---|---|
| phase transformation | تحول طوري |
| projector lens | عدسه اسقاطية |
| photon | فوتون |
| photoelectson | الكترون فوتوني |
| photocathode | مهبط فوتوني |
| phase diagsam | مخطط طوري |
| polymers | بوليمرات |
| Pollutant | ملوث |
| proportional counter | عداد تناسبي |
| process | عمليه |
| precipitation | ترسيب |
| precipitates | ترسبات |
| point fraction | كسر نقطي |
| potential field | مجال الجهد |
| pyrometer | مقياس درجات الحراره |
| potential energy | طاقة كامنه |
| point imperfection | خلل نقطي |
| penumbra | شبه الظل |
| photographic film | فلم تصوير |

| | |
|---|---|
| power supply | مجهز قدره |
| pottery | فخاريات |
| Piezo- electsic effect | التأثير الكهربائي الاجهادي |
| probe | مجس |
| piping defects | عيوب انبوبيه |
| potentiometer | مقياس الجهد |
| pin-cushion distortion | تشويه وساده الدبابيس |
| point difect | عيب نقطي |
| proportionality limit | حد التناسب |
| plastic strain | انفعال لدن |
| proof stress | اجهاد الصمود |
| Probability | احتماليه |
| pictorial method | طريقة صوريه |
| product | منتوج ، منتج |
| point source | مصدر نقطي |
| prolate | شبه كروي متطاول |
| permeability | المنفذية |
| photochemical effect | تأثير كيميائي ضوئى |
| pump | مضخة |

| | |
|---|---|
| pure | نقي |

# Q

| | |
|---|---|
| quality control | السيطرة النوعية |
| quantum mechanics | ميكانيك كمي |
| quantum theory | نظرية الكم |
| quantum state | مستوى كمي |
| quantitative metallography | الميتالوغرافيه الكمية |
| quenching | اخماد |

# R

| | |
|---|---|
| raw material | مادة خام |
| random | عشوائى |
| rays | أشعه |
| radiations | اشعاعات |
| radioactive decay | اضمحلال أشعاعي |
| radioactive isotopes | نظائر مشعه |
| radiography | فحص شعاعي |

| | |
|---|---|
| radius | نصف قطر |
| raster | نمط خطوط المسح (راسم) |
| reactivity | تفاعليه |
| reactive | مفاعله |
| resistivity | مقاوميه |
| resolution | تمييز، ميز |
| resolcing power | قدره التمييز |
| rectifier | جهاز معدل التيار المتناوب |
| rest mass | كتلة السكون |
| refractive index | دليل الانكسار |
| reciprocal lattice | الشبكية المعكوسة |
| reflected electrons | الكترونات منعكسه |
| recrystallisation | اعادة التبلور |
| reduction | اختزال |
| reaction | تفاعل |
| rhombohedral=Trigonal | ثلاثي الاضلاع |
| reflection coefficient | معامل الانعكاس |
| receiver | مستلم |
| rigidity | جسوء ، جساءه |

| | |
|---|---|
| repeating stsess | اجهاد متكرر |
| relative frequency | تكرار نسبي |
| reliability | وثوقيه |
| reproducible | امكانية الاعادة |
| rolling | دحو، درفلة |
| rotary pump | مضخة ميكانيكية دوّاره |
| roughing pumping | ضخ اولي |
| roughing vacuum | فراغ اولي |
| rupture | تهشم ، انهيار |
| resistance | مقاومة |

## S

| | |
|---|---|
| sand blast | النفث الرملي |
| sample | نموذج |
| seams | ثنيات |
| scheme | نهج، اسلوب، خطه، مخطط |
| schematic diagram | رسم توضيحي |
| scattering | استطاره |

| | |
|---|---|
| semimetals | اشباه المعادن |
| semiconductors | اشباه الموصلات |
| secondary electrons | الكترونات ثانوية |
| single crystal | بلوره احاديه |
| specimen | عينه |
| stiffness | صلابه |
| stacking foult | خلل النسق |
| soft X-rays | اشعة سينيه ضعيفة |
| space | فضاء |
| statistic | احصاء |
| spectrometer | مطياف |
| structure factor | معامل البينه |
| screw dislocation | انخلاعه لولبيه |
| surface morphology | تضاريس السطح |
| substrate | ماده سانده تحتيه |
| scintillator | عداد ومضي |
| secondary ion emission microscope | مجهر بعث الايونات الثانوية |
| solid angle | زاوية صلبه |
| semi-quantitative | شبه كمي |

| | |
|---|---|
| strain | انفعال |
| stress | اجهاد |
| stereology | علم التجسيم(الذي يمكن استخراج معلومات بثلاث ابعاد من بيانات مأخوذة من بعدين) |
| structure | بنيه ، تركيب |
| subcritical assebly | التجمع قبيل الحرج |
| spheroidization | تكوير |
| stress-relieving | ازالة الاجهاد |
| slab | بلاطه |
| silica brick | طابوق السليكا |
| solute atoms | ذرات مذابه |
| solvent | مذيب |
| static systems | اجهزة أو أنظمة سكونيه |
| segregation | فرز |
| stress -corrosion | تآكل اجهادي |
| scrap | منبوذات ، خرده |
| steel | فولاذ |
| scanning electron microscope | المجهر الالكتروني الماسح |
| scaler | معداد |

| | |
|---|---|
| sagittal | سهمي |
| stigmator | مبئِر |
| sputtering | رش |
| space charge | شحنه الحيز |
| strength | مقاومه ميكانيكه |
| shearing force | قوة قصيه |
| sensitivity | حساسيه |
| surface finish | انهاء سطحي |
| standard dimensions | ابعاد قياسيه |
| sheets | صفائح |
| screw | لولب |
| shock loads | احمال صدميه |
| sharpness | حِده |
| striking energy | طاقة الاصطدام |
| slip bands | اشرطة الانزلاق |
| scratch | خدش |
| sinusoidal | جيبي |
| standard deviation | انحراف معياري |
| statistical population | مجتمع احصائى |

| | |
|---|---|
| subgroup | طويفه |
| selection | اختيار |
| specifications | مواصفات |
| scale | تدريج |
| supplier | مجهِز |
| stress relaxation | ارتخاء الاجهاد |
| software | برامجيات |

## T

| | |
|---|---|
| target | هدف |
| tangential | مماسي |
| test | فحص، اختبار |
| tensile stress | اجهاد الشد |
| tensile testing | اختبار الشد |
| tempering | مراجعة |
| thermal neutrons | نيوترونات حراريه |
| thickness | سُمك |
| tetragonal | رباعي الاضلاع |

| | |
|---|---|
| torque | عزم |
| trails | محاولات |
| tie-Line | خط الربط، خط الوصل |
| take off angle | زاوية القطع |
| true stress | اجهاد حقيقي |
| twisting | ليّ |
| topography | تضاريس |
| twinning | توأمه |
| triogonal = rhombohedral | ثلاثي الاضلاع |
| triclinic | ثلاثي الميل |
| thin film | غشاء رقيق |
| toughness | متانه |
| thermometer | محرار |
| thermocouple | مزدوج حراري |
| thermoelectric effect | التأثير الكهربائى الحراري |
| temperature | درجة الحرارة |
| thermos | ترمس، وعاء حافظ للحراره |
| transition metals | معادن انتقاليه |
| technology | تقنيه |

| | |
|---|---|
| thermal test | الفحص الحراري |
| thermal neutrons | نيوترونات حراريه |
| transmission coefficient | معامل النفوذ |
| transmission eleclson microscope | مجهرالكتروني نافذ |
| transducer | محول طاقة |
| transmitter | مرسل (باعث) |
| television | تلفاز |
| thermistor | متحسس درجة الحراره (الثرميستور) |

# U

| | |
|---|---|
| ultrasonic waves | امواج فوق السمعيه |
| ultraviolet | فوق البنفسجية |
| uncertainty principle | قاعدة عدم التأكد |
| units | وحدات |
| under cooled | دون المبرد |
| unit cell | خليه اساسيه |

# V

| | |
|---|---|
| vapour | بخار |
| vapour pumps | مضخات بخاريه |
| valve | صمام |
| vacuum | فراغ |
| vacancies | شغور، فراغات |
| vactor | متجه |
| vice | ملزمه |
| variance | تباين |
| variation | تغير |
| vessel | وعاء |
| velocity | سرعه |
| vibration | اهتزاز |
| video | ترئيه الصور (تحويلها من اشارات الكترونيه الى صور مرئيه) أو حامل الصور |
| Volt | فولت |
| voltage | فولتيه |
| volume | حجم |
| volume fraction | كسر حجمي |
| vertical | عمودي |

# W

| | |
|---|---|
| wave front | جبهة الموجه |
| wavelength | طول موجي |
| wall | جدار |
| washing | غسل |
| washer | قَلْكه |
| wave number | العدد الموجي |
| wavelength dispersive spectrometer | المطياف للأطوال الموجية |
| white radiation | اشعة بيضاء |
| wheel | دولاب |
| wedge | اسفين |
| white metal bearing | معادن المرتكزات البيضاء |
| wet | رطب |
| wear | بلى، بلي |
| weather | جو، طقس |
| welding | لحام |
| weldability | اللحاميه |
| wrought metals | معادن مشكله |
| workability | قابلية التشغيل |
| work function | دالة الشغل |

## X

| | |
|---|---|
| X-rays | أشعة سينيه |

## Y

| | |
|---|---|
| yieldpoint | نقطة الخضوع |
| yield strength | مقاومة الخضوع |
| young modulus | معيار يونك (معيار المرونه) |

## Z

| | |
|---|---|
| zinc | خارصين |
| zone | منطقة |

# المؤلف في سطور

- نال شهادة البكالوريوس سنة ١٩٦٦ من جامعة بغداد
- حصل على شهادة الماجستير سنة ١٩٧٠ من نفس الجامعة ثم عمل كمدرس مساعد فيها.
- نال شهادة الدكتوراة في حقل هندسة المعادن من جامعة ستراثكلايد في بريطانيا سنة ١٩٨١.
- عين كمدرس في قسم هندسة الانتاج والمعادن في الجامعة التكنولوجية بغداد –العراق.
- قام بتدريس العديد من المواضيع النظرية والعملية في الجامعة التكنولوجية ولمرحلتي الدراسات الأولية والعليا الجامعية وفي مختلف الاقسام.
- شارك في العديد م
- ن الندوات والمؤتمرات العلمية اضافة الى دورات التعليم المستمر.
- أشرف على العديد من طلبة الدراسات العليا (١٥ طالب ماجستير و٥ طلاب دكتوراة )
- لة ٣٧ بحثا في مجال الاختصاص في مجلات عالمية وعراقية.
- ترجم كتابين هما :
- المواد الهندسية مدخل لخواصها وتطبيقاتها. طبع لحساب الجامعة التكنولوجية سنة ١٩٩٠.
- المعادن بنيتها وخواصها ومعاملاتها الحرارية.طبع لحساب الجامعة التكنولوجية سنة ١٩٨٩.
- لة كتاب (( النحاس وسبائكة )) معد للطبع.
- كان عضو في مختلف اللجان الجامعية كالجنة العلمية ولجنة الترقيات العلمية ولجنة البيئة.
- نال مرتبة الاستاذ المشارك سنة ١٩٨٧.
- لة عدة بحوث جارية حاليا.
- حصل على مرتبة الاستاذية في بداية سنة ١٩٩٣.
- منح مع اعضاء المجموعة براءة الاختراع المرقمة ٢٥٢٩ والمؤرخة في ١٩٩٤/٤/٢٥ والمسجلة في جهاز التقيس والسيطرة النوعية – العراق.
- كان عضو هيئة تحرير مجلة الهندسة والتكنولوجيا.
- شغل منصب رئيس فرع هندسة المعادن لاكثر من مرة.
- منح براءة اختراع ثانية مرقمة ٢٧٢٤ ومؤرخة في ١٩٩٨/٧/٢٨ مسجلة في جهاز التقيس والسيطرة النوعية – العراق.
- لة خدمة جامعية تربو على ثمانية وعشرين سنة.
- لا يزال يعمل استاذ في كلية الهندسة / دائرة هندسة المواد والمعادن / جامعة البلقاء التطبيقية / الاردن ويشرف حاليا على عدد من طلبة الدراسات العليا.

# اختبارات المواد الهندسية




المعتز
للنشر والتوزيع

عمّان - خلدا
هاتف 5352086-5010244 / 079
ص.ب 184034 عمّان 11118 الأردن